Fraunhofer
IBP

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerd Hauser
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer

IBP-Bericht HTB-13/2013

Ermittlung von Materialeigenschaften und effektiven Übergangsparametern von Dachbegrünungen zur zuverlässigen Simulation der hygrothermischen Verhältnisse in und unter Gründächern bei beliebigen Nutzungen und unterschiedlichen Standorten

Abschlussbericht

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungs-initiative „Zukunft Bau" des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: SF-10.08.18.7-11.18 / II 3-F20-10-1-100)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Dipl.-Ing. Beate Schafaczek
Dipl.-Ing. Daniel Zirkelbach

Holzkirchen, 29. April 2013

Abteilungsleiter	Gruppenleiter	Bearbeiter
Dr.-Ing. Hartwig M. Künzel	Dipl.-Ing. Daniel Zirkelbach	Dipl.-Ing. Beate Schafaczek

Fraunhofer-Institut für Bauphysik
Nobelstraße 12 · D-70569 Stuttgart
Telefon +49 (0) 711/970-00
Telefax +49 (0) 711/970-3395
www.ibp.fraunhofer.de

Institutsteil Holzkirchen
Fraunhoferstr. 10 · D-83626 Valley
Telefon +49 (0) 8024/643-0
Telefax +49 (0) 8024/643-366
www.bauphysik.de

Projektgruppe Kassel
Gottschalkstr. 28a · D-34127 Kassel
Telefon +49 (0) 561/804-1870
Telefax +49 (0) 561/804-3187

Inhaltsverzeichnis

1 EINFÜHRUNG 4

1.1 GEGENSTAND DER UNTERSUCHUNGEN 4
1.2 ZIELE DES FORSCHUNGSVORHABENS 5
1.3 GRUNDLAGEN DER DACHBEGRÜNUNG 5
1.3.1 Formen der Begrünung 5
1.3.2 Schichtaufbau 6
1.3.3 Bautechnische Voraussetzungen 6
1.4 HYGROTHERMISCHE SIMULATIONEN 7

2 LITERATURRECHERCHE 9

2.1 KURZFASSUNG UND BEWERTUNG DER EINZELNEN PUBLIKATIONEN 9
2.2 ZUSAMMENFASSUNG DER WESENTLICHEN ERKENNTNISSE 19

3 ENTWICKLUNG EINES GENERISCHEN BERECHNUNGSMODELLS FÜR DACHBEGRÜNUNGEN AUF BASIS VON FREILANDMESSUNGEN AN VERSCHIEDENEN STANDORTEN 21

3.1 FREILANDVERSUCHE DES IBP IN HOLZKIRCHEN 21
3.2 FREILANDVERSUCHE DER MFPA IN LEIPZIG 24
3.3 FREILANDVERSUCHE DER HOLZFORSCHUNG AUSTRIA IN WIEN 26
3.4 FREILANDVERSUCHE DES ZUB IN KASSEL 27

4 NEUE LABOR- UND FREILANDVERSUCHE AM IBP ZUR ENTWICKLUNG EINES SPEZIFISCHEN BERECHNUNGSMODELLS FÜR DACHBEGRÜNUNGEN 29

4.1 FREILANDVERSUCH - VERSUCHSAUFBAU UND MESSTECHNISCHE ERFASSUNG 29
4.2 MESSUNG DER SUBSTRATKENNWERTE IM LABOR 33
4.3 ERWEITERUNG DES BERECHNUNGSMODELLS FÜR SPEZIFISCHE SUBSTRATE AUF BASIS DER LABOR- UND FREILANDMESSUNGEN 35
4.4 VALIDIERUNG DER MODELLANSÄTZE ANHAND DER AUSWIRKUNGEN AUF LEICHTBAUKONSTRUKTIONEN 44

5 VALIDIERUNG DES SPEZIFISCHEN GRÜNDACHMODELLS AM STANDORT MAILAND 47

6 LEITFADEN ZUR BERECHNUNG VON EXTENSIV BEGRÜNTEN DÄCHERN 49

6.1 GENERISCHES GRÜNDACHMODELL 49
6.2 SPEZIFISCHES GRÜNDACHMODELL 50

7 ENERGETISCHE VORTEILE EINES GRÜNDACHS 52

8 KONSTRUKTIONSEMPFEHLUNGEN 54

8.1 DURCHGEFÜHRTE UNTERSUCHUNGEN 54
8.2 ERGEBNISSE 56
8.3 EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS 60
8.4 WEITERE HINWEISE ZUR AUSFÜHRUNG VON BEGRÜNTEN LEICHTBAUKONSTRUKTIONEN 61

9 ZUSAMMENFASSUNG 62

10 LITERATUR 64

11 TABELLEN 68

12 BILDER 96

Verzeichnis der verwendeten Symbole, Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol / Formelzeichen / Abkürzung	Einheit	Bezeichnung
a	-	kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl
ε	-	langwellige Strahlungsemissionszahl
λ	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
c	J/kgK	Wärmekapazität
T	°C	Temperatur
w	kg/m²√h	Wasseraufnahmekoeffizient
μ	-	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
s_d	m	Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke
u_f	kg/m³	freie Wassersättigung
u_{max}	kg/m³	maximale Wassersättigung
ρ	kg/m³	Rohdichte
α	W/m²K	Wärmeübergangskoeffizient
SW		Südwest
NO		Nordost
NR		Nachrechnung
MW		Mineralwolle
XPS		extrudierter Polystyrol-Hartschaum
EPS		expandierter Polystyrol-Hartschaum
FKD		Festkörperdränage
HDPE		Hart-Polyethylen (englisch: High Density Polyethylen)

1 Einführung

1.1 Gegenstand der Untersuchungen

Da ein großer Teil innerstädtischer Flächen durch Gebäude und Straßen versiegelt ist, werden als klimatische Ausgleichsflächen seit über 30 Jahren in Deutschland zunehmend Dachbegrünungen ausgeführt. Bei Niederschlägen nehmen die Schichten einer Dachbegrünung zunächst das Wasser auf, bis der Zustand der Wassersättigung erreicht ist. Das aufgenommene Regenwasser wird durch Verdunstung über Substrat und Bepflanzung wieder an die Atmosphäre abgegeben, wodurch die Dachbegrünung teilweise die Funktionen von Mutterboden übernimmt.

Außerdem schützen die Dachbegrünungen die Dachabdichtungen vor extremen Temperaturschwankungen und erhöhen dadurch die Lebensdauer der Dachhaut.

Die Latentwärmespeicherung (Eisbildung, Verdunstung) sowie die Masse der Begrünung führen zu deutlich geringeren Temperaturschwankungen im Jahresverlauf. Dadurch sind die unerwünschten Wärmegewinne im Sommer und -verluste im Winter deutlich geringer als bei einer einfachen Dachabdichtung, was aus energetischer Sicht günstig sein kann. Das Einsparpotential gegenüber einer normalen Dachbahn liegt, wie in einer neuen Untersuchung [1] jüngst wieder bestätigt wurde, bei bis zu zusätzlich 25 % bei aktuellen Dämmdicken. Mangels einer genauen Quantifizierung dieser Einsparpotentiale kann der Vorteil bei der energetischen Bemessung bisher allerdings nicht berücksichtigt werden.

Die energetischen Vorteile eines Gründaches dürfen natürlich im Gegenzug nicht zu Feuchteproblemen und Bauschäden führen. Die Anforderungen an das energieeffiziente Bauen sind in den letzten Jahren stark gestiegen. Damit verbunden sind größere Dämmstoffdicken, so dass heute fast nur noch unbelüftete Warmdachkonstruktionen ausgeführt werden. Gerade aber an unbelüfteten Gründächern traten in letzter Zeit vermehrt Bauschäden auf. Eine der möglichen Ursachen ist, dass diese wie alle Flachdächer auf der bauphysikalisch „falschen“ Seite, der Außenseite, dicht sind – eine Trocknung also nur nach Innen möglich ist. Im Unterschied zu Flachdächern ohne Deckschicht ist die Erwärmung bei Gründächern jedoch weitaus geringer, so dass das Trocknungspotential auch im Sommer gering bleibt. Die Kombination aus Begrünung und feuchteempfindlicher Holzkonstruktion führt somit zu wenig fehlertoleranten Konstruktionen, deren Planung und Ausführung besondere Sorgfalt erfordert.

Den erhöhten Planungsanforderungen stehen bisher nur unzureichend bekannte hygrothermische Verhältnisse unter den Eindeckungsschichten gegenüber. Hier stoßen auch erfahrene Fachplaner an ihre Grenzen und empfehlen häufig auf eine andere Dachkonstruktion auszuweichen, da Ansätze auf der sicheren Seite oft nur mit zusätzlichen Dämmschichten unter der Abdichtung oder energetisch ungünstigeren Belüftungen zu realisieren sind. Die Schwierigkeiten der Abbildung einer Dachbegrünung in Simulationsprogrammen wurde

z.B. auch bei der abschließenden Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses zum im Rahmen von „Zukunft Bau“ geförderten Forschungsprojekts (Z 6 – 10.08.18.7-07.18) [2] zum hygrothermischen Verhalten von Flachdächern in Holzbauweise der TU München und der MFPA Leipzig deutlich. Die dort durchgeführten Messungen unter der Begrünung ließen sich mit dem im Rahmen des Projekts möglichen Aufwand nur sehr ungenau abbilden. Der dringende Bedarf an einer solchen rechnerischen Beurteilungsmöglichkeit wurde von den anwesenden Forschungseinrichtungen und Fachplanern deutlich zum Ausdruck gebracht.

Ebenso wurde 2008 in einer umfangreichen Publikation des Informationsdienstes Holz mit dem Titel „Flachdächer in Holzbauweise“ [3] auf die Schwierigkeiten der Beurteilung von Dachbegrünungen hingewiesen: „Die Einflüsse der Substrat- und Vegetationsschicht können bisher nicht eindeutig rechnerisch abgebildet werden, es fehlen verallgemeinerbare Datensätze“. Empfehlungen zu Dachbegrünungen könnten aus diesem Grund derzeit nicht aufgenommen werden.

Die fehlenden Planungsgrundlagen stehen also derzeit einem vermehrten Einsatz der ökologisch sinnvollen und energetisch nachweislich vorteilhaften Begrünungen entgegen.

1.2 Ziele des Forschungsvorhabens

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden die Grundlagen geschaffen, um Dachbegrünungen – insbesondere auch auf Holzkonstruktionen – mit Hilfe hygrothermischer Simulationen zuverlässig berechnen und planen zu können. Basierend auf teilweise vorhandenen und teilweise neu durchzuführenden Messungen werden die spezifischen Oberflächenübergangseigenschafen und die Materialeigenschaften typischer Substratmaterialien ermittelt, so dass berechnete und gemessene Verhältnisse unter der Begrünung möglichst gut übereinstimmen. Damit soll künftig sowohl die spezifische Quantifizierung von winterlichem und sommerlichem Wärmeschutz als auch eine feuchtetechnisch sichere Planung der Unterkonstruktion möglich werden.

Ziel ist es, dem Planer und Bauproduktthersteller eine möglichst genaue und zuverlässige Grundlage für die Planung der Feuchtesicherheit der kritischen Dachbegrünungen zur Verfügung zu stellen.

1.3 Grundlagen der Dachbegrünung

1.3.1 Formen der Begrünung

Im Wesentlichen wird bei der Begrünung von Dächern zwischen zwei Ausführungsvarianten unterschieden: Extensiv- und Intensivbegrünung.

Die Extensivbegrünung zeichnet sich durch einen dünnschichtigen Aufbau (bis zu 15 cm), geringes Gewicht und minimalen Pflegeaufwand aus. Diese Vegetationsform erhält sich weitgehen selbst und passt sich auch an extreme Standortbedingungen an, ist allerdings nicht als Nutzfläche geeignet. Im Vergleich dazu ist bei einer Intensivbegrünung die Nutzung des Gründaches erwünscht. Der mehrschichtige Aufbau ist hier mit 15 cm bis 100 cm deutlich dicker und

damit auch schwerer und stellt hohe Ansprüche an die Pflege, Wasser- und Nährstoffversorgung.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wird jedoch ausschließlich die Extensivbegrünung untersucht.

1.3.2 Schichtaufbau

Beide Vegetationsformen der Dachbegrünung müssen die Funktionen von Vegetations-, Filter- und Dränschicht erfüllen. Bei Extensivbegrünungen werden oft einschichtige Aufbauten eingesetzt, die gleichzeitig alle drei Funktionen erfüllen können. Bei Intensivbegrünungen hingegen kommen meist mehrschichtige Aufbauten zum Einsatz.

Die Vegetationstragschicht dient als Wurzelraum für die Pflanzen und zur Speicherung von Wasser und Nährstoffen. Diese kann aus mineralischen Schüttstoffgemischen mit variierendem Anteil anorganischen Substanzen (z.B. Lava, Bims, Blähton, Blähschiefer) oder Recycling-Schüttstoffen (z.B. Ziegelbruch) bestehen.

Die Filterschicht trennt die Vegetationsschicht von der Dränschicht und verhindert damit das Verschlämmen der Dränschicht durch eingeschwemmtes Dachsubstrat. Die verwendeten Materialien müssen durchwurzelbar und wasserdurchlässig sein, z.B. Geotextilien oder Kunststoffvliese.

Die Dränschicht dient sowohl zur Speicherung von Wasser als auch zur Ableitung von überschüssigem Wasser. Neben Schüttstoffen stehen hier auch Dränmatten, Dränplatten aus Kunststoff sowie Dränelemente aus Kunststoff oder Mineralfaser zur Verfügung.

1.3.3 Bautechnische Voraussetzungen

Als Planungsgrundlage für Dachbegrünungen dienen zum einen die Richtlinien für die Planung und Ausführung von Dächern mit Abdichtung (Flachdachrichtlinie) [4] und zum anderen die Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen (FLL-Dachbegrünungsrichtlinie) [5].

Begrünbar sind grundsätzlich alle Dächer mit Neigungen von 1 ° bis 45 ° [6], wobei ab 4 ° Neigung Maßnahmen gegen das Abrutschen des Aufbaus zu treffen sind.

Auch an die Statik sind besondere Anforderungen zu stellen. Neben der Schneelast und Verkehrslast (bei zugänglichen Dachgärten) ist auch der Aufbau bei maximaler Wassersättigung plus Vegetation als ständige Last zu berücksichtigen.

Ein weiteres Augenmerk ist auf die Ent- und Bewässerung zu legen. Eine Entwässerung durch eine funktionierende, ausreichend dimensionierte Dränageschicht ist wichtig, Dachabläufe und Entwässerungsrinnen müssen das Wasser ungehindert ableiten können. Intensivbegrünungen müssen im Bedarfsfall regelmäßig bewässert werden – dazu sind also Wasseranschlüsse auf dem Dach vorzusehen.

1.4 Hygrothermische Simulationen

Die rechnerischen Untersuchungen erfolgen mit Hilfe des am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) entwickelten und vielfach experimentell validierten Verfahrens zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen WUFI® [7]. Das Programm WUFI® entspricht u.a. den Anforderungen der WTA [36], der europäischen Norm DIN EN 15026 [37] sowie des ASHRAE Standard 160 [38] für hygrothermische Simulationen.

Die Grundlage des Berechnungsmodells WUFI® bildet ein geschlossenes Differentialgleichungssystem, welches aus den in [7] beschriebenen physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Wärme- und Feuchtetransports sowie der Wärme- und Feuchtespeicherung entwickelt wurde. In WUFI® werden die für bauphysikalische Betrachtungen maßgeblichen Transport- und Speichermechanismen von Wärme und Feuchte realitätsnah berechnet. Beim Feuchtetransport ist dies zum einen die Dampfdiffusion, welche auf den thermischen Eigenbewegungen der Moleküle im gasförmigen Zustand beruht sowie der Flüssigtransport, der sich aus der Oberflächendiffusion (Flüssigtransport im Sorbatfilm hygroskopischer Stoffe in Richtung der geringeren relativen Feuchte) und der Kapillarleitung (Flüssigtransport in der gefüllten Pore in Richtung des Kapillardruckgefälles) zusammensetzt. Auch Lösungsdiffusion in organischen Polymeren kann berücksichtigt werden. Beim Wärmetransport wird die Wärmeleitung in Abhängigkeit vom jeweiligen Wassergehalt der Materialien, aber auch der Latentwärmetransport (Wasserdampfdiffusion mit Phasenwechsel) berücksichtigt. Die Feuchtespeicherung setzt sich zusammen aus der Sorptionsisotherme, der Feuchtespeicherung im Kapillarwasserbereich und der Übersättigung – wobei nicht-hygroskopische Materialien entweder gar keine Feuchtespeicherung (dampfdicht) oder nur den Übersättigungsbereich aufweisen.

Für die Klimarandbedingungen werden stündlich gemessene Werte für Temperatur, Luftfeuchte, Niederschlag, Wind, Sonnen- und atmosphärische Gegenstrahlung verwendet. Dies erlaubt sowohl die Beurteilung der Aufnahme von Schlagregen, als auch Umkehrdiffusion bei Erwärmung der Außenoberfläche durch die Sonne oder nächtliche Unterkühlung durch langwellige Abstrahlung. Im Innenraum können Messwerte oder vereinfachte Modelle für das Raumklima verwendet werden.

Für die Berechnung wird das Bauteil mit seinen verschiedenen Schichten in das Modell eingegeben, entsprechend der realen Situation orientiert und geneigt, und die Einwirkung der Klimabedingungen über die Oberflächenübergangskoeffizienten festgelegt. Das Ergebnis der Berechnung liefert die Zeitverläufe der Temperatur- und Feuchtefelder über den berechneten Querschnitt, also die Temperaturen, Wassergehalte und relativen Feuchten für jeden Zeitschritt und jede Position innerhalb der Konstruktion. Die Berechnungsergebnisse sind anhand von zahlreichen Freiland- und Laboruntersuchungen weltweit umfassend validiert. Bei genauer Kenntnis der Randbedingungen und Materialkennwerte ist eine Wiedergabe der realen Verhältnisse mit sehr guter Genauigkeit möglich. Für die Betrachtung der Gründächer sind trotzdem erneute Validierungsberechnungen von Freilandversuchen erforderlich, da weder die Materialeigenschaften der Substratschichten noch die Oberflächenübergangsbedingungen und die Strahlungsabsorption und -emission genau bekannt sind.

Bei normalen Flachdachabdichtungen beeinflussen im Wesentlichen nur die Außenlufttemperatur und die Strahlungsabsorption und -emission die auf die Unterkonstruktion einwirkenden Belastungen. Bei einer Dachbegrünung kommen hingegen noch zahlreiche weitere Effekte hinzu. Zunächst weist die Deckschicht selbst eine deutlich höhere Wärmespeicherfähigkeit auf, was zu einer größeren Trägheit der Konstruktion beiträgt. Noch stärker machen sich Latentwärmeeffekte bemerkbar, die im Winter beim Gefrieren des in der Schicht enthaltenen Wassers dafür sorgen, dass der Temperaturbereich um 0 °C auch bei deutlich niedrigeren Außentemperaturen nur selten und wenig unterschritten wird. Auch im Sommer werden infolge der hohen Speicherfähigkeit des Substrats, der teilweisen Selbstverschattung durch den Bewuchs und die Verdunstung aus Substrat und Bepflanzung gegenüber der Außenluft im Mittel nur geringfügig höhere Oberflächentemperaturen erreicht. Bei den meisten Wand- und Dachkonstruktionen sind Temperaturniveau und Dauer des Winters für die Feuchteverhältnisse maßgeblich – bei Gründächern, die auch bei niedrigeren Temperaturn selten die Null-Grad-Linie unterschreiten scheinen dagegen eher Dauer und Strahlungsaufkommen im Sommer über ein Funktionieren zu entscheiden.

Um all die zuvor beschriebenen Effekte zu berücksichtigen, müssen Strahlungsverhältnisse, Feuchteaufnahme-, Transport- und Speicherfähigkeit etc. der Materialien sehr genau erfasst werden. Dies ist nur teilweise über Messungen im Labor möglich. Insbesondere bezüglich der gespeicherten Regenwassermengen, der Oberflächenübergangsbedingungen und der Strahlungsabsorption und -emission kann eine abschließende Anpassung nur anhand einer Kombination von Laborversuchen und Auswertung sowie Nachsimulation von Freilandversuchen erfolgen.

2 Literaturrecherche

Gründächer waren in den letzten Jahren immer wieder Gegenstand von wissenschaftlichen Untersuchungen und Publikationen. Daher wurde im Rahmen des Projekts auch eine Literaturstudie durchgeführt, um zu klären, welche für das Projekt relevanten Untersuchungsergebnisse ggf. bereits existieren bzw. auch um ergänzende Informationen zu sammeln.

Beiträge, die entweder nur ausgeführte Objekte beschreiben oder inhaltlich die Thematik dieses Projekts gar nicht berühren, werden aufgrund der zum Schluss doch recht großen Zahl hier gar nicht mehr aufgeführt.

2.1 Kurzfassung und Bewertung der einzelnen Publikationen

- **Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) (Hrsg.): Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen – Dachbegrünungsrichtlinie. Bonn 2008. [5]**

  Die Richtlinie stellt für Planer und Ausführende von Dachbegrünungen eine Art Standardwerk dar: „Zweck der Richtlinie ist es, allgemein gültige Grundsätze und Anforderungen für die Planung, Ausführung und Unterhaltung darzustellen, die dem derzeitigen Stand der Erkenntnisse entsprechen und den Stand der Technik wiedergeben. Sie beziehen sich auf die Objektebene mit ergänzenden Planungs- und Baugrundlagen und haben ihren Schwerpunkt in den bau- und vegetationstechnischen Anforderungen. Sie richten sich an die Fachleute aller beteiligten Fachbereiche und Gewerke." (Kap. 1.2)

  Die Bedeutung der Richtlinie wird auch dadurch deutlich, dass in fast allen deutschsprachigen Quellen auf sie verwiesen wird. Wie zuvor zitiert, liegen die Schwerpunkte auf der Sicherstellung der baulichen und statischen Anforderungen und der Sicherstellung eines dauerhaften Pflanzenwachstums. Bauphysikalische Fragestellungen werden nicht direkt behandelt – es wird lediglich in Kapitel 5.5 darauf hingewiesen, dass „das Diffusionsverhalten in Abhängigkeit von der Raumnutzung" zu beachten ist. Trotzdem können teilweise aus den Angaben zumindest ergänzende Informationen für das aktuelle Projekt entnommen werden:

  Dies sind z.B.

  - Lastannahmen für trockene und feuchte Substrate
  - Klassifizierung der verschiedenen Begrünungsarten (z.B. extensiv, einfach intensiv, intensiv)
  - erforderliche Eigenschaften von Pflanz-, Drän-, Filter- und Speicherschichten
  - Wasserrückhaltung und –bevorratung
  - eingesetzte Substrattypen und deren Zusammensetzung und Eigenschaften

  Die Definition der Extensivbegrünung ist wie folgt: „Extensivbegrünungen sind

naturnah gestaltete Vegetationsformen, die sich weitgehend selbst erhalten und weiterentwickeln. (…) Extensivbegrünungen sind i. d. R. mit geringerem Aufwand herstellbar und zu unterhalten. In Abhängigkeit vom Begrünungsziel, den regionalen klimatischen Bedingungen und der Bauweise können Pflegemaßnahmen erforderlich werden." (Kap. 3.1.4).

Als Vegetationsformen werden bei Extensivbegrünungen Moss-Sedum, Sedum-Moos-Kraut, Sedum-Moos-Gras und Gras-Kraut unterschieden (Kap. 3.2.4).

„Für Extensivbegrünungen und Einfache Intensivbegrünungen sollen Dächer mit einem Gefälle von mindestens 2 % der Regelfall sein. Eine geregelte Entwässerung entspricht den grundsätzlichen Bedürfnissen der Vegetation von Extensivbegrünungen." (Kap. 5.3)

Die Anforderungen an die maximale Wasserkapazität von Vegetationssubstraten (dies entspricht in der Bauphysik in etwa der freien Wassersättigung der Substrats) im eingebauten und verdichteten Zustand wird mit folgenden Werten angeben: für mehrschichtige Aufbauten bei Intensivbegrünungen 45 Vol.-% (450 kg/m³) und bei Extensivbegrünungen 35 Vol.-% (350 kg/m³). Bei Einschichtbauweisen liegen die Werte für Intensivbegrünungen bei 30 Vol.-% und Extensivbegrünungen bei 20 Vol.-%. 65 Vol.-% sollten generell nicht überschritten werden, um Vernässungen zu vermeiden." (Kap. 10.2.7).

- **DDH Edition: Gründach. Rudolf Müller Verlag. Band 14. [8]**

  Band 14 der DDH Edition Reihe beschäftig sich mit der Dachbegrünung. Interessant sind hier vor allem die Marktübersicht zu Drän- und Filterschichten (Seite 53-59), Vegetationstragschichten (Seite 60-64) und Vegetationsarten (Seite 65-68).

  Der Artikel Leicht und Grün (Seite 10) stellt einen gewissen Trend zu kostengünstigen und statisch weniger beanspruchenden Leichtbegrünungen fest und liefert einen Überblick der verfügbaren Systeme und der Anforderungen bei der Begrünung von Leichtdächern. In eine ähnliche Richtung geht der Beitrag: Wenig Schichten – viele Vorteile (Seite 20), der erläutert, dass auch bei Einschichtaufbauten gute Begrünungen möglich sind.

  Garantie fürs Gründach (Seite 70) gibt Hinweise auf wesentliche Aspekte bei der Ausführung, die die Dauerhaftigkeit und Schadensfreiheit von Dachbegrünungen stark beeinflussen.

- **Schweizerische Fachvereinigung Gebäudebegrünung: Gebäudebegrünung. Dach – Fassade – Innenraum. [9]**

  Gibt einen Überblick über die Grundlagen von Begrünungen (Begrünungsarten, Gründe für eine Begrünung, Planung, Unterhalt und Pflege). Vergleichbar zu [5].

- **Verband für Bauwerksbegrünung: Grundlagen der Dachbegrünung. 2007. [10]**

  Grundlagen (Argumente für ein Gründach, Formen der Begrünung, Begrünungsverfahren, Schichtaufbau, verwendete Materialien, bautechnische Voraussetzungen). Vergleichbar zu [5] und [9].

- **Minke, G.; Otto, F,; Gross, R.: Ermittlung des Wärmedämmverhaltens von Gründächern. Abschlussbericht, AZ 24242-25. ZUB Kassel. Juli 2009. [1]**

  Die hier vorgestellten Untersuchungen beschäftigen sich mit dem Energieeinsparpotential von Dachbegrünungen im Sommer und Winter. Diese werden an Freilanduntersuchungen von verschiedenen Prüffeldern über vergleichende Messungen (Temperaturverhältnisse und Wärmeströme) über einen Zeitraum von einem Jahr durchgeführt.

  Die Ergebnisse zeigen sowohl die Temperaturunterschiede zwischen Außenluft, Dach mit Dachbahn (Referenzfall schwarze Dachbahn) und den verschiedenen Begrünungen als auch die unterschiedlichen Wärmeströme durch die Dachkonstruktionen. Teilweise liegen letztere unerwartet hoch mit Einsparpotentialen von bis zu 19 % bezogen auf den Wärmestrom im Regelquerschnitt. Als maßgeblich für den Wärmehaushalt werden die Eigenschaften des Substrats und die Art der Vegetation angegeben.

  Der Feuchtehaushalt der Substrate bzw. deren hygrothermische Materialeigenschaften werden nicht betrachtet.

- **Häupl, P.; Petzold, H.: Hygrothermische Untersuchungen an begrünten Flachdächern. Tagungsband zum 12. Bauklimatischen Symposium an der TU Dresden. S. 893 – 900. Dresden 2007. [11]**

  Der Artikel beschäftigt sich mit dem hygrothermischen Verhalten von begrünten Flachdächern. Im Beitrag werden plausibel erscheinende Annahmen für die Begrünung gewählt – die allerdings weder anhand von Laborversuchen noch anhand von Objektuntersuchungen überprüft werden konnten – und die Konstruktionen mit Hilfe hygrothermischer Simulationen bewertet. Die Annahmen für die Materialkennwerte weichen teilweise sehr deutlich von den heute bekannten Bandbreiten der Substrate ab. Insgesamt stellt der Artikel eine recht einfache Annäherung an das im Rahmen dieses Forschungsprojekts untersuchte Thema dar.

- **Liesecke, H.-J.:**

  Substrate für extensive Dachbegrünungen (Teil 1) – Vergleichende Beurteilung der Eigenschaften aus Eignungsuntersuchungen 1990/1995/2002. Neue Landschaft 6/03. S. 40-44. 2003. [12]

Substrate für extensive Dachbegrünungen (Teil 2) – Vergleichende Beurteilung der Eigenschaften aus Eignungsuntersuchungen 1990/1995/2002. Neue Landschaft 8/03. S. 44-47. 2003. [13]

Kennwerte von Vegetationssubstraten für extensive Dachbegrünungen. Dach+Grün 3/2004. S. 30-37. 2004. [14]

Kennwerte von Vegetationssubstraten für extensive Dachbegrünungen – Ableitung von Kennwerten, Eigenschaften von Substrattypen und Stoffgruppen, Lastannahmen und Wasserspeicherung. Neue Landschaft 1/06. S. 44-51. 2006. [15]

Kennwerte für mineralische Schüttstoffe. Neue Landschaft 11/04. S. 33-39. 2004. [16]

Frostbeständigkeit von Mineralstoffen für die Dachbegrünung – Ergebnisse von Laborprüfungen und Erkenntnisse aus Freilanduntersuchungen. Neue Landschaft 2/05. S. 38-41. 2005. [17]

Vegetationstechnische Anforderungen in der Dachbegrünungsrichtlinie – Zur Diskussion gestellte Vorschläge für die Weiterentwicklung. Dach+Grün. 4/2005. S. 4-10. 2005. [18]

Kennwerte für Matten- und Platten-Elementen – Schichtdicken, Lastannahmen, Wasserspeicherung. Neue Landschaft. 6/06. S. 56-59. 2006. [19]

Langzeitentwicklung von Substraten für die extensive Dachbegrünung – Veränderungen im Gehalt an organischer Substanz, im pH-Wert, in der Wasserspeicherung und in der Lastannahme. Dach+Grün. 3/2006. S. 4-7. 2006. [20]

Liesecke beschäftigt sich in zahlreichen Publikationen sehr ausführlich mit den Eigenschaften der für Begrünungen eingesetzten Substrate. Dabei wurden insgesamt etwa 200 verschiedene Substrate von mehr als 20 Herstellern untersucht. Die Publikationen zu den Substraten werden hier zusammen beschrieben, da sie sich immer wieder thematisch überschneiden – einige andere Publikationen mit stärker abgegrenzter Thematik werden nachfolgend separat aufgeführt. Die Substrate werden unterschieden nach Einschicht- und Mehrschichtsubstrate, wobei erstere sämtliche Funktionen des Gründachs (Vegetation, Dränung, Filterung) in einer Schicht leisten müssen während bei den mehrschichtigen Aufbauten die einzelnen Schichten separat auf den jeweiligen Aspekt optimiert werden. Bei extensiver Dachbegrünung finden Einschichtsubstrate häufiger Verwendung – bei Intensivbegrünungen gar nicht (wird hier aber nicht weiter betrachtet).

Mehrschichtsubstrate, wie in [12], [13], [14] und [15] beschrieben, bestehen aus einem Gemisch von gebrochenem Sand- und Kieskörnung unter Zugabe von organischer Substanz (überwiegend Rindenhumus oder Komposte). Einschichtsubstrate bestehen aus abgestuften, gebrochenen Fein- und

Mittelkieskörnungen. Immer mehr wird zur Verbesserung der Wasserspeicherfähigkeit organische Substanz beigemischt. Die genaue Auswirkung wurde aber messtechnisch kaum erfasst. Zur Saatbettverbesserung und zur Verbesserung des Aufwuchses nach Erstellung des Dachs hat sich das Aufbringen einer dünnen Auflage an organischer Substanz bewährt.

Eine Analyse der von Liesecke angegebenen Materialeigenschaften zeigt eine leichte Tendenz zu einem Anstieg der maximalen Wasserkapazität mit der Rohdichte – dies entspricht auch den Erfahrungen aus dem bauphysikalischen Bereich, da eine größere Masse an Material in der Regel auch ein größeres zur Wasserspeicherung geeignetes Porenvolumen aufweist. Die Hohlräume zwischen den Substratkörnern tragen in der Regel nicht zur zusätzlichen Speicherfähigkeit bei – daher ergibt sich auch aus [16] der folgende Zusammenhang: größere Korngröße – geringere Rohdichte – geringere Wasserkapazität.

Weiterhin ist bei Mehrschichtsubstraten eine höhere Wasserspeicherung und maximale Sättigung zu beobachten – auch dies ist nicht überraschend, da bei den Einschichtsubstraten ja neben der Speicherung auch die Filterung und Dränung gewährleistet werden muss und die Dränung bezüglich der erforderlichen Eigenschaften einer hohen Speicherfähigkeit entgegengesetzt ist. Dass die höhere Speicherfähigkeit der Mehrschichtsubstrate mit dem höheren Anteil an organischen Bestandteilen zusammenhängt, zeigt vor allem [20].

Auch die Frostbeständigkeit von mineralischen Schüttstoffen wird untersucht. Dabei zeigt sich, dass Ytong, Porit, Hoss und die Mehrzahl der Bimskörnungen frostempfindlich sind, während Liapor (Blähton), Leca, Lava, Sand und Kiessand keine Strukturänderungen aufwiesen. Neben dem durch alte Pflanzenteile bedingten Anstieg der organischen Bestandteile im Lauf der Zeit dürften vor allem Frostschädigungen zu einer Veränderung der Eigenschaften (Verfeinerung der Körnung – besonders stark ausgeprägt bei Blähschiefer) führen. Letzteres scheint jedoch nach Aussage von Substratherstellern eher umstritten zu sein.

Auf Basis der verschiedenen Untersuchungen wurden auch Vorschläge zur Weiterentwicklung der Richtlinien in Bezug auf die Abflusskennzahl, Wasserrückhaltung, Anteil an Ton und Schluff, Kornverteilungsbereiche, Gehalt an organischer Substanz, Wasserdurchlässigkeit und Wasserspeicherfähigkeit, Salzgehalt, Prüfungen und Lastannahmen entwickelt. Für die Wasserspeicherfähigkeit sollten demzufolge die Mindestwerte für die drei Substratgruppen um jeweils 5 Vol.-% angehoben werden auf Intensiv > 50 Vol.-%, Extensiv-mehrschichtig > 40 Vol.-% und Extensiv-einschichtig > 25 Vol.-%. Diese Forderungen wurden bisher allerdings nicht umgesetzt.

- **Liesecke, H.-J.: Zur Verwendung von Hydrogelen in der Dachbegrünung – Erfahrungen und Ergebnisse aus Versuchen und mit einer Neuentwicklung. Neue Landschaft. 11/05. S. 41-45. 2005. [21]**

  Eine Analyse der vorliegenden Untersuchungen (Kurztests) lassen keine genaue Aussage darüber zu, ob die Verwendung von Hydrogelen (höhere Bindungsintensität des Wassers bei allerdings geringerer Wasserspeicherung) im Vergleich zu den üblichen Speichervliesen Vorteile aufweist – dazu wären langfristigere Freilanduntersuchungen notwendig.

- **Liesecke, H.-J.: Jährliche Wasserrückhaltung durch extensive Dachbegrünungen. Dach+Grün. 2/2005. S. 4-13. 2005. [22]**

  Der Beitrag beschäftigt sich mit der empirischen Ermittlung und Auswertung der jährlichen Wasserrückhaltemengen am Versuchsstand in Hannover-Herrenhausen. Dies ist relevant für Fragestellungen im Rahmen von Bodenversiegelung und Planung der Grundstücksentwässerung. Es wird beschrieben, welche Parameter einer Dachbegrünung auf die jährliche Wasserrückhaltung Einfluss nehmen. Dabei zeigte sich, dass nicht nur die Aufbaudicke sondern auch der Substrattyp und die Art der Dränung großen Einfluss auf die Wasserrückhaltung haben. Insgesamt liegen die Wasserrückhaltemengen im Bereich zwischen 40 und 50 % der Niederschlagsmengen, so dass die Abflussmengen in etwa halbiert werden können.

  Die Ergebnisse lassen im weitesten Sinne Rückschlüsse auf die Wasserkapazität der Substrate zu. Da diese jedoch in anderen Beiträgen auch explizit bestimmt wurde, stellen die Erkenntnisse zu den im Rahmen des Projekts betrachteten Fragestellungen nur eine Ergänzung dar.

- **Palomo del Barrio, E.: Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. Energy and Buildings 27. S. 179-193. 1998. [23]**

  Palomo del Barrio beschäftigt sich mit der Entwicklung eines mathematischen Modells zur Beurteilung des thermischen Verhaltens von Gründächern – allerdings beschränkt auf den Einsatz einer Begrünung in warmem Klima (Kühlung).

  Das aufgestellte Modell berücksichtigt und gewichtet zwar wesentliche Einflussfaktoren, wird allerdings nicht anhand von Labor- oder Praxisversuchen validiert und überprüft. Große Bedeutung wird dem LAI (leaf area index – in etwa: Blattflächenindex) zugemessen, der die Verschattung der Dachoberfläche durch die Bepflanzung beschreibt. Ein Wert < 1 bedeutet, dass das Substrat nicht vollständig verschattet ist, bei 1 ist die Blattfläche gleich der Dachoberfläche was einer gerade vollständigen Verschattung entspricht und bei Werten > 1 wird das Dach durch mehr als eine Blattlage verschattet. Der LAI ist allerdings für die praktische Verwendung wenig hilfreich, da weder eine Bestimmungsmethode noch typische Werte für spezifische Bepflanzungstypen angegeben werden.

  Vor allem das Fehlen der Aufnahme von Niederschlag und die genaue Berechnung der Feuchtebilanz scheint allerdings eine sehr deutliche Einschränkung des Modells zu sein. Letztere spielt bei sehr feuchtem Klima oder regelmäßiger Bewässerung zwar keine so große Rolle – spätestens im Winter, wenn auch die Wärmekapazität und das Einfrieren des Wassers relevant werden, stößt das Modell aber definitiv an seine Grenzen.

  Der Modellansatz erscheint einerseits komplex und umfassend, vernachlässigt andererseits den sehr wichtigen Einfluss von Niederschlagsaufnahme und –speicherung. Eine Bewertung ist aufgrund der fehlenden Vergleiche mit Messdaten nicht möglich.

- **Roth-Kleyer, S.: Fünf Jahre Ergebnisse aus Geisenheim – Substratforschung von 2003 bis 2007. Dach+Grün 3/2008. S. 10-17. 2008. [24]**

  Ziel des Artikels ist es, Dachsubstrate und Dränschichtschüttstoffe auf Einhaltung der Vorgaben aus der FLL 2002 mit den dort angegebenen Untersuchungsmethoden zu beurteilen und bezüglich Kennwerten und Qualitäten übersichtlich dazustellen. Die Untersuchungen zeigen dabei, dass die Anforderungen von den Herstellern zunehmend weitgehend eingehalten werden.

- **Roth-Kleyer, S.: Ein Gründach hilft der Siedlungswasserwirtschaft. Dach+Grün Spezial 2009. S. 22-29. 2009. [25]**

  Der Beitrag beschäftigt sich mit dem Einfluss des Gründaches auf die Wasserwirtschaft. Positive Effekte sind: die Verringerung des Wasserabflusses aus Niederschlägen, eine Verzögerung des Abflusses bzw. des Anteils an Überschusswasser, der das Wasseraufnahmevermögen der Dachbegrünung übersteigt, Speicherung von pflanzenverfügbarem Wasser und die Verdunstung von Wasser durch Pflanzen und Substrat. Die beeinflussenden Parameter sind: maximale Wasserkapazität, Wasserdurchlässigkeit, Abflussbeiwert, Verzögerung des Wasserabflusses, Jahresabflussbeiwert.

- **Theodosiou, T. G.: Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. Energy and Buildings 35. S. 909-917. 2003. [26]**

  Die Autoren stellen fest, dass die kühlende Wirkung von Dachbegrünungen in Klimastudien bisher noch zu wenig beachtet wird. Dies ist auf die schwierige Simulation einer solchen Begrünung zurückzuführen. Daher wird ein Modell zur Berücksichtigung von Dachbegrünungen in thermischen Gebäudesimulationen entwickelt. Dieses Modell ist ein analytischer mathematischer Ansatz, der für einen 20tägigen Testzeitraum validiert optimiert wird. Das Modell wird nicht genau beschrieben, scheint sich aber an [23] zu orientieren und ebenso wie dieses den realen Feuchtehaushalt weitgehend zu vernachlässigen. Wiederum wird der LAI als besonders maßgeblich betrachtet – typische Werte werden aber nicht angegeben. Die Anwendbarkeit dürfte auf warmes Außenklima und konstant feuchte (Verdunstungskühlung) und genau bekannte Verhältnisse im Substrat beschränkt sein.

- **Lazzarin R. G.; Castellotti, F.; Busato, F.: Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. Energy and Buildings 37. S. 1260-1267. 2005. [27]**

  Die Untersuchungen beschäftigen sich mit dem positiven Einfluss der Begrünung auf einen niedrigeren Kühlbedarf im Sommer. Das entwickelte Modell beschränkt sich daher auch auf den durch das Dach fließenden Wärmestrom und ermittelt nicht die hygrothermischen Verhältnisse in und unter der Begrünungsschicht. Die berechneten Werte werden mit den gemessenen auf einem Gebäude in Vicenza / Italien verglichen, wobei im Jahr 2002 gute, in 2003 und 2004 nur passable Übereinstimmungen erzielt werden.

Das Verdunstungspotential wird auf eine immer wassergesättigte Deckschicht bezogen, ohne deren Feuchtebilanz mitzuführen. Damit ergeben sich die selben Anwendungsgrenzen wie bei den zuvor vorgestellten Modellansätzen – die Inhalte können, mit Ausnahme der energetischen Betrachtungen, zu den im Rahmen dieses Projekts untersuchten Fragestellungen wenig beitragen und die winterlichen Verhältnisse sind gar nicht erfassbar.

- **Sailor, D.J.; Hutchinson, D.; Bokovoy, L.: Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S. Energy and Buildings 40. S. 1246-1251. 2008. [28]**

  Recht umfassender Überblick über die hygrothermischen Eigenschaften von in den USA gebräuchlichen Substraten und deren Bandbreite. Auch langwellige und kurzwellige Strahlungseinflüsse sowie die Feuchteabhängigkeit der Kennwerte werden mit berücksichtigt. Die Daten werden für das vom selben Autor wenig später veröffentlichte Gründachberechnungsmodell [30] benötigt.

- **Alexandri, E.; Jones, P.: Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. Energy and Buildings 42. S. 2835-2849. 2007. [29]**

  Fokus der Untersuchungen liegt wiederum auf dem energetischen Vorteil einer Dachbegrünung. Allerdings wird hier bereits betont, dass die Feuchtebilanz im Substrat auch essentiell für eine genaue Berechnung der thermischen Verhältnisse ist. Das aufgestellte Modell ist bezüglich der berücksichtigten Parameter bereits recht vollständig – es fehlen aber wiederum geeignete Ansätze für die Aufnahme und Speicherung von Niederschlag. Daher wird für die Validierung ein klarer Tag ohne Niederschlag im August herangezogen. Verfügbar wäre zwar ein ganzer Monat – gemeinsame Übereinstimmung an Tagen mit unterschiedlichen Witterungsverhältnissen konnte allerdings nicht erzielt werden. Es ist zu vermuten, dass die Übereinstimmung in kalten Monaten nochmals deutlich ungünstiger ausfällt. Es wird angemerkt, dass bei den meisten Gebäudesimulationsprogrammen die Wasserdampfdiffusion weggelassen wird, da der Effekt als zu klein angesehen wird. Der Autor betont jedoch, dass für Außenklimasimulationen, wo der Temperatur- und der Dampfgradient sehr groß werden können, die Nichtberücksichtigung der Wasserdampfdiffusion schon zu einem ungenauen Ergebnis führen kann.

  Im Prinzip bestätigt die Publikation, dass ein Modell, wie es jetzt im Rahmen des Projekts ermittelt wurde für eine genaue Berechnung auch der thermischen Verhältnisse definitiv erforderlich ist.

- **Sailor, D.J.: A green roof model for building energy simulation programs. Energy and Buildings 40. S. 1466-1478. 2008. [30]**

  Im Rahmen der vorgestellten Untersuchungen wurde ein weiterer auf [23] basierender Ansatz für ein Gründachmodell zur Implementierung in thermischen Gebäudesimulationsprogrammen entwickelt. Das Modell beinhaltet bis auf wenige Ausnahmen alle maßgeblichen Einflussfaktoren und

feuchtevariablen Materialeigenschaften (langwellige und kurzwellige Strahlung, Pflanzdeckschicht, windabhängiger Wärmeübergang, Verdunstungskühlung, feuchteabhängige Materialeigenschaften, Wärmeleitung und –speicherung) die für eine möglichst realitätsnahe Simulation erforderlich sind. Sogar der Diffusionswiderstand der einzelnen Blätter und deren Feuchtespeicherkapazität wird berücksichtigt – Daten die in der Praxis wohl in den wenigsten Fällen verfügbar sind.

Lediglich der Latentwärmeeinfluss der Schmelzwärme der im Substrat enthaltenen Feuchte wird nicht berücksichtigt – Verdunstungskühlung dagegen wiederum unter Annahme von konstant feuchten Verhältnissen berechnet - also variabel ausschließlich aufgrund der Temperatur- und Feuchteverhältnisse der Luft. Dem LAI wird ebenfalls ein großer Einfluss auf das thermische Verhalten der Begrünung im Sommer zugeschrieben – wiederum können aber weder einfache Messmethoden noch typische Werte für spezifische Substrattypen angegeben werden – so dass eine Anwendung des LAI für die verschiedenen hier verwendeten Begrünungstypen bzw. eine Übertragung auf Verschattungsbeiwerte für die Praxis wenig hilfreich erscheint.

Die Validierung erfolgt anhand des Vergleichs der gemessenen Temperaturen einer Dachbegrünung in Florida über verschiedene Zeiträume verteilt über ein Jahr. Dabei wird deutlich, dass die ermittelten Temperaturen zwar eine noch recht gute Übereinstimmung mit den Messwerten zeigen – allerdings permanent gegenüber den Messwerten zu hoch liegen. Dies mag für eine konservative Beurteilung des positiven Effekts zur Energieeinsparung sinnvoll sein – für die hygrothermische Bauteilbemessung bei mitteleuropäischen Verhältnissen ist der Ansatz allerdings nicht geeignet.

- **Kumar, R.; Kaushik, S.C.: Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. Energy and Buildings 40. S. 1505-1511. 2005. [31]**

  Die Untersuchungen beschäftigen sich ebenfalls mit einem Modellansatz für Gebäudesimulation – spezifisch für die Verhältnisse in subtropischem und tropischem Klima. Auch hier wird der Feuchteeinfluss über die Verdunstungskühlung berücksichtigt, eine genaue Entwicklung des Wassergehalts in der Substratschicht, der Einfluss der Schmelzwärme und der atmosphärischen Gegenstrahlung scheinen aber nicht mit erfasst zu werden. Der LAI wird noch einmal sehr ausführlich beschrieben und erklärt – ohne dass dem Nutzer für die Praxis hilfreiche Größenordnungen oder Messmöglichkeiten zur Verfügung gestellt werden.

  Die Validierung anhand eines Vergleichs mit den über 5 Tagen im Juni 2001 verfügbaren gemessenen Temperaturen in der Dachbegrünungsschicht eines Dachgartens in Indien zeigt eine gute Übereinstimmung bezüglich der Temperaturverhältnisse. Weiterhin ist der Vergleich der mit einer thermischen Gebäudesimulation ermittelten Temperatur im Gebäude mit den Messwerten im Monat Juni enthalten. Warum unterschiedliche Zeiträume für die Validierung herangezogen wurden und der Messzeitraum für Pflanzschichttemperaturen nur fünf Tage beträgt, ist nicht weiter erläutert. Es ist jedoch wiederum zu beachten, dass bei der Berechnung immer von einer vollständigen Durchfeuchtung des Substrats ausgegangen wird – eine Berechnung der

Feuchtebilanz und damit des Feuchtegehalts und Verdunstungspotentials in Abhängigkeit von den auftreffenden Niederschlagsmengen also gar nicht erfolgt. Damit ist eine Übertragbarkeit auf andere Klimabedingungen – insbesondere in Mitteleuropa, wo die Heizperiode gegenüber einer (nur für wenige Gebäude überhaupt relevanten) Kühlperiode dominant bleibt.

- **Wolf, D.; Lundholm, J.T.: Water uptake in green roof microcosmos: Effects of plant species and water availability. Ecological Engineering 33. S. 179-186. 2008. [32]**

  Auch in diesem Beitrag geht es vor allem um die energetischen Vorteile der Verdunstungskühlung von Gründächern. Es werden verschiedene Pflanzenarten auf Substraten mit verschiedenen Bewässerungsmethoden (trocken, mittel und nass) untersucht. Die trockene Methode haben nur Sukkulenten überlebt. Auch war die trockene Methode die einzige, die einen größeren Wasserverlust (über Verdunstung) aufwies als ein Vergleichssubstrat ohne Bepflanzung. Manche Pflanzen verhindern sogar die Verdunstung von Wasser über die Substratoberfläche bei der mittleren und nassen Bewässerungsmethode. Der optimale Wasserverlust und Kühlung der Dachoberfläche kann durch die Bepflanzung mit verschiedenen Pflanzarten verstärkt werden.

- **Sailor, D.J.; Elley, T.B.; Gibson, M.: Exploring the Building Energy Impacts of Green Roof Design Decisions – A Modeling Study of Buildings in 4 Distinct Climates. Building Enclosure Science & Technology (BEST 3) Conference. 2012. [33]**

  Basierend auf dem in [30] vorgestellten Berechnungsmodell wird hier der Energiebedarf verschiedener Dachbegrünungen (Substratdicke 5- 30 cm, LAI 0.5-2) im Vergleich zu Dächern mit normal dunkler und weißer Dachbahn (cool roof) an verschiedenen Klimastandorten in den USA untersucht.

  Die Ergebnisse zeigen, dass die Dachbegrünung sich energetisch günstiger verhält als eine dunkle Dachbahn – und zwar sowohl im Sommer als auch im Winter. Ein Dach mit heller Dachbahn dagegen benötigt generell weniger Kühlenergie im Sommer – hat aber im Gegenzug Nachteile im Winter. Hier hängt es also von den jeweiligen Heiz- und Kühlenergiebedarfen ab, ob eher eine Dachbegrünung (kältere Standorte) oder eine weiße Dachbahn (wärmere Standorte) zu bevorzugen ist. Die Ergebnisse gelten jeweils für Gebäude mit hohem Dämmstandard.

- **Künzel, H.M.: Feuchteverhalten begrünter Umkehrdächer. Sonderdruck aus BBauBL 45. H. 5, S. 382-384. 1996. [34]**

  Bezieht sich nur auf die Feuchtegehalte in der Dämmschicht von Umkehrdachdämmungen – die hier vorgestellten Untersuchungen dienen u.a. als Basis zur Berechnung des Feuchtehaushalts von Substratschichten. Die maßgeblichen Einflussfaktoren für die Befeuchtung (Temperaturniveau im Raum, Anteil der Dämmung unterhalb und oberhalb der Dachabdichtung usw.) werden benannt und Empfehlungen für die Bemessung des langfristigen R-Werts angegeben.

- **Künzel, H.M.; Kießl, K.: Moisture Behaviour of Protected Membrane Roofs with Greenery. CIB W40 Proceedings Kyoto. 1997. [35]**

  Die Untersuchungen zeigen die feuchtetechnischen Verhältnisse unter Dachbegrünungen im bayerischen Alpenvorland. Taupunkttemperatur-messungen im Juli und August 1995 zeigen, dass die relative Feuchte unter einem Gründach selbst in den wärmsten und trockensten Perioden des Jahres fast immer bei annähernd 100 % liegt.

  Ein vereinfachter Berechnungsansatz unter Annahme konstant hoher Feuchten und unterschiedlich hoher Feuchten über den Dämmplatten wird vorgestellt und zur Berechnung des langfristigen Feuchtehaushalts in den Dämmplatten von Umkehrdachdämmungen verwendet.

2.2 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse

Die Substrateigenschaften vieler Publikationen beschränken sich auf die thermischen Eigenschaften, da der Fokus der meisten Untersuchungen nicht auf dem Bauteilverhalten, sondern eher auf dem Energiebedarf des Gebäudes lag. Ebenfalls eine Rolle spielt häufig die Niederschlagsrückhaltung, die für die Bemessung der Abwassermengen benötigt wird. Auch bei den Untersuchungen zur Ermittlung des Energiebedarfs von Gebäuden mit Dachbegrünungen stellen die Autoren allerdings fest, dass eine zuverlässige Berechnung nur mit Berücksichtigung des Feuchtehaushalts der Deckschichten möglich ist – hier spielt vor allem die Verdunstungskühlung eine wesentliche Rolle. Werden diese Effekte vernachlässigt, ist keine zufriedenstellende Übereinstimmung mit Messwerten zu erzielen.

Da mit den verwendeten Modellen in der Regel die Aufnahme von Niederschlagsfeuchte, deren Speicherung, der Transport innerhalb des Substrats in flüssiger Form sowie die in der Folge variable Wärmekapazität nicht abgebildet werden können, wird meist pauschal ein permanent durchfeuchtetes Substrat mit entsprechend hohen Verdunstungsraten angenommen. Regenaufnahme und Latentwärme des Schmelzvorgangs werden in keinem der Modelle berücksichtigt. Dies mag für Klimate, bei denen eine künstliche Bewässerung erfolgt, vertretbar sein – den Feuchtehaushalt ohne Bewässerung in Sommer und Winter unter mitteleuropäischem Klima kann man mit diesen Ansätzen allerdings nicht ermitteln.

Vor allem Liesecke und Sailor beschäftigen sich mit den Bandbreiten der Substrateigenschaften zahlreicher Produkte und Hersteller. Die angegebenen Größenordnungen der thermischen Kennwerte sowie der Wassersättigung dienen als Orientierung und zur Plausibilitätsprüfung der im Rahmen des Projekts im Labor ermittelten Eigenschaften und Kennwerte der Substrate. Für die Feuchtespeicherung sowie Diffusionseigenschaften und Flüssigtransport konnten in der Literatur keine Materialkennwerte gefunden werden.

Da detaillierte Untersuchungen zu den Eigenschaften der Pflanzdeckschicht selbst im Rahmen des Projekts nicht durchgeführt werden können, bestand zunächst die Hoffnung für Strahlungsabsorption, Wärmeübergang und Verschattung geeignete Ansätze in der Literatur zu finden. Hier erschien

zunächst vor allem der LAI (leaf area index) vielversprechend, der die Verschattung der Dachoberfläche durch die Pflanzen scheinbar recht genau beschreibt. Allerdings werden von den verschiedenen Autoren weder typische Werte für die verschiedene Bepflanzungsarten noch eine Bestimmungsmethode für den LAI vorgestellt, so dass dieser für den praktischen Einsatz im Zusammenhang mit einer hygrothermischen Bauteilsimulation wenig hilfreich erscheint. Zum windabhängigen Wärmeübergang waren in den ausgewerteten Publikationen gar keine verwertbaren Informationen enthalten.

Die hygrothermische Simulation beschäftigt sich mit dem Transport und der Speicherung von Wärme- und Feuchte in Baustoffen. Die Aufnahme, Speicherung und Weiterverteilung von Niederschlagswasser ist hierbei in vielen Fällen wesentlich. Die aus den eigenen Untersuchungen bereits gewonnene Erkenntnis, dass eine Berechnung der thermischen Verhältnisse ohne Berücksichtigung der Feuchteeinflüsse kaum möglich ist, bestätigt sich auch durch die Auswertung der unterschiedlichen Modelle aus der Literatur. Da alle wesentlichen Effekte in der hygrothermischen Simulation bereits enthalten sind, werden nur geeignete Materialeigenschaften und Übergangsparameter erforderlich. Da sich die anderen Modelle sich in ihren Ansätzen entweder von den hygrothermischen Simulation zu stark unterscheiden oder nicht ausreichend detailliert sind, sind sie für die Fragestellungen des Projekts nur bedingt hilfreich.

Die thermischen Messungen aus [1] werden mit den vom ZUB zur Verfügung gestellten Daten teilweise zur Validierung des generischen Gründachmodells in Kapitel 3 mit herangezogen – allerdings sind die für die hygrothermische Simulation erforderlichen Material- und Außenklimadaten nur teilweise verfügbar.

3 Entwicklung eines generischen Berechnungsmodells für Dachbegrünungen auf Basis von Freilandmessungen an verschiedenen Standorten

3.1 Freilandversuche des IBP in Holzkirchen

Am Standort des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) in Holzkirchen wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts im Industrieauftrag ab 1985 auf einem quadratischen Versuchsdach mit einer Größe von 12 m auf 12 m verschiedene Umkehrdachvarianten (begrünt und bekiest) aufgebracht und bezüglich ihres hygrothermischen Verhaltens untersucht.

Einige Versuche endeten nach vier bzw. sieben Jahren, andere wurden durch neue Systeme ersetzt oder unterteilt. Regelmäßige Messungen des Feuchtegehalts der Dämmschichten fanden im Abstand von einigen Monaten bis 1992 statt. Neben der Aufzeichnung des normalen Außenklimas mit der Wetterstation des IBP (Lufttemperatur, relative Feuchte, Niederschlag, Diffus- und Globalstrahlung, Luftdruck sowie Windgeschwindigkeit und -richtung) wurden teilweise auch die Temperaturen unter den Deckschichten erfasst – 1995 und 1996 für ein gesamtes Jahr unter einer Bekiesung und einer Begrünung. Diese Messdaten waren lange Zeit die einzige detaillierte Datenquelle, anhand derer versucht werden konnte, eine Begrünung in der hygrothermischen Simulation zu berücksichtigen.

Das Versuchsdach war über einem beheizten Laborraum angeordnet. Es wurden insgesamt acht Umkehrdächer mit unterschiedlichen Aufbauten mit einer Grundfläche von 3 m x 6 m oder 3 m x 3 m aufgebaut. Bild 1 zeigt das begrünte Umkehrdach mit seinen verschiedenen Versuchsfeldern. Die Versuche starteten 1985, die letzten wurden 2004 beendet. Tabelle 1 zeigt die verschiedenen Dachaufbauten, welche sich durch die Dämmdicke und die Dränschichten voneinander unterscheiden. Bei den Dächern 1 – 4 lag das Augenmerk auf dem Wassergehalt in den XPS-Platten und dessen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Dafür wurden in regelmäßigen Abständen aus den Dämmplatten Proben entnommen und im Labor gemessen. Anhand der Dächer 5 und 6 kann der Einfluss unterschiedlicher Dränschichten auf den Feuchtegehalt in der Substratschicht beurteilt werden. Dach 5 hat eine Dränschicht aus normalem Kies, Dach 6 aus wasserspeicherndem Blähton, wodurch das Pflanzenwachstum verbessert werden soll. Um die Temperatur und relative Feuchte direkt an der Oberfläche der Dämmplatten zu bestimmen, wurden Sensoren für Temperatur und Taupunkttemperatur in der Mitte des Versuchsfeldes installiert. Die Messungen wurden über den Zeitraum von einem Jahr kontinuierlich durchgeführt, um genauere Informationen über die sich unter der Substratschicht einstellenden Temperatur- und Feuchteverhältnisse zu bekommen. Bild 2 zeigt den Vergleich der Lufttemperatur mit der Temperatur unter der Kiesschicht von Dach 5. Im Vergleich zur Schwankungsbreite der Lufttemperatur zwischen -18 °C und 35 °C zeigen die Temperaturen unter der Kiesschicht mit Werten zwischen -4 °C und 35 °C im Winter einen viel flacheren Verlauf.

Bezüglich der Feuchte in der Substratschicht zeigen die Messergebnisse, dass die besten Trocknungsbedingungen im Juli und August zu erwarten sind, wenn

die Außenlufttemperatur und die Dachtemperatur ihre Maximalwerte erreichen. Im Jahr 1995 war der Juli für das Klima in Holzkirchen verhältnismäßig warm (Monatsmittelwert 19,2 °C) und trocken (Niederschlagsmenge 40 mm), während im August (15,7 °C, 230 mm) eher durchschnittliche Werte erreicht wurden. Bild 3 und Bild 4 zeigen den Verlauf der Temperatur (gestrichelte Linie) und der Taupunkttemperatur (durchgezogene Linie) an der Oberfläche der Dämmplatten für die Dächer 5 und 6 sowie die tägliche Niederschlagsmenge während dieser beiden Monate. Es zeigt sich, dass Temperatur und Taupunkttemperatur die meiste Zeit weitgehend identisch verlaufen, auch in Zeiten mit wenig Niederschlag. Das bedeutet, dass die relative Feuchte hier nahe 100 % liegt. Wenn die Taupunkttemperatur unter die Umgebungstemperatur fällt, sinkt auch die relative Feuchte entsprechend und deutet auf Trocknungsbedingungen an den Dämmplatten hin. Anders als der Blähton hält der Kies in Dach 5 weniger Regenwasser zurück, so dass dieser schneller austrocknet. Das führt zu einigen kürzeren Perioden, in denen die Taupunkttemperatur bis zu etwa 8 °C unter die Umgebungstemperatur fällt; dabei werden relative Feuchten von unter 85 % erreicht. Während dieser Perioden ist eine gewisse Trocknung der Dämmplatten nach oben möglich. Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse, dass die relative Feuchte unter der Substratschicht die meiste Zeit mit Werten nahe 100 % sehr hoch ist. Lediglich bei Aufbauten ohne wasserspeichernde Dränageschicht kann die relative Feuchte für eine kurze Zeit in sehr warmen und trockenen Perioden im Sommer unter 90 % fallen.

Auf Grundlage der hier erlangten Messdaten wurden mit Hilfe hygrothermischer Simulationen die Materialkennwerte der Substratschicht iterativ so angepasst, dass sich die Messwerte gut nachrechnen lassen. Die rechnerischen Untersuchungen erfolgen mit Hilfe des am Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) entwickelten und vielfach experimentell validierten Verfahrens zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen WUFI® [7] (siehe Kapitel 1.4).

In einem ersten Schritt wurden nur die thermischen Kennwerte der Substratschicht anhand der Temperaturen unter der Deckschicht von Dach 5 angepasst. Das Außenklima auf dem Freilandversuchsgelände des IBP in Holzkirchen wird seit 1985 stündlich aufgezeichnet. Diese gemessenen Klimadaten können als Außenklima für die Nachrechnung von Dach 5 während der Versuchsperiode 1995 und 1996 verwendet werden. Bild 5 (links) vergleicht die gemessenen und berechneten Temperaturen unter der Deckschicht. Eine perfekte Übereinstimmung über das ganze Jahr konnte nicht erreicht werden – vor allem im Winter, wenn Schnee auf dem Dach liegt, kommt es zu Abweichungen. Der Schnee wirkt wie eine zusätzliche „Dämmung“ und führt in der Realität zu einer höheren Temperatur, während die Schneeschicht bei der Berechnung mangels geeigneter Klimadaten und Modelle nicht berücksichtigt werden kann. Deshalb erfolgt die Anpassung der Eigenschaften so, dass die Temperaturen im Winter unter die Minimalwerte fallen, im Sommer aber die Maximalwerte nicht überschritten werden dürfen. So liegt die Berechnung ganzjährig etwas auf der sicheren Seite. Die aus dieser Anpassung resultierenden Unterschiede sind für eine extreme Situation (eine Woche im Februar, Bild 5 Mitte) dargestellt: die gemessene schwarze Kurve bleibt immer bei Temperaturen um 0 °C, während die berechnete Temperatur auf -10 °C und die Außenlufttemperatur sogar auf -17 °C fällt. Im Juli (Bild 5, rechts) stimmen die beiden Temperaturverläufe gut

überein – die berechnete Temperatur liegt nur geringfügig unter der gemessenen.

In einem zweiten Schritt müssen die Feuchtespeicherfunktion, der Flüssigtransport und der Wasserdampfdiffusionswiderstand angepasst werden, um auch den sich in der Substratschicht einstellenden Feuchtegehalt abbilden zu können. Diese Anpassung der hygrothermischen Kennwerte erfolgt hauptsächlich über die Nachrechnung des Wassergehalts in den Dämmplatten. In diesem Fall wird Dach 1 mit einer Substratschicht auf einer Blähtonschicht berechnet, weil bei diesem Aufbau wie in den Messungen deutlich wurde die relative Feuchte unter der Substratschicht kaum unter 99 % fällt und zudem die Kennwerte der XPS-Dämmplatten bekannt sind. Der Aufbau von Dach 1 ist in Bild 6 dargestellt. Exemplarisch ist für diese Anpassung in Bild 7 die Berechnung mit verschiedenen Werten für die freie Wassersättigung (u_f) der Substratschicht im möglichen Bereich von 200 kg/m³, 300 kg/m³ und 700 kg/m³ (20, 30 oder 70 Vol.-%) dargestellt. Eine eher niedrige freie Wassersättigung von 200 kg/m³ führt zu der besten Übereinstimmung zwischen den gemessenen Punkten und der berechneten Kurve. Ein Wert von 700 kg/m³ für die freie Wassersättigung erscheint zu hoch. Da eine Substratschicht normalerweise eine hohe Wasserrückhaltung haben sollte, um den Bewässerungsbedarf zu minimieren, wird der Wert von 300 kg/m³ für die weiteren Berechnungen angesetzt.

Da die Niederschlagsfeuchte vom Substrat nicht nur durch dessen Kapillarleitung aufgenommen wird, sondern auch mit der Schwerkraft durch die Deckschicht nach unten durchsickert, können die Feuchteverhältnisse nicht allein über die Kapillarleitung simuliert werden – es muss zusätzlich ein Teil des Niederschlagswasser über eine Feuchtequelle direkt in die Substrat- und Kiesschicht eingebracht werden. Alle Berechnungen ohne diese zusätzlichen Feuchtequellen ergaben entweder eine zu geringe Wasseraufnahme bei Niederschlag oder eine zu schnelle Trocknung der Deckschichten in wärmeren Perioden. Die Quelle im Substrat beschränkt sich auf die unteren beiden Zentimeter der Schicht, in denen 40 % des auftreffenden Niederschlags bis zum Erreichen der freien Sättigung des Materials eingebracht werden. Die Quelle im Kies wird über die gesamte Schichtdicke angeordnet und führt ebenfalls 40 % des Niederschlags direkt zu. Die freie Wassersättigung des Kieses liegt bei 50 kg/m³, was in etwa einer vollständigen Benetzung der Steinoberflächen mit Wasser nach einem Niederschlagsereignis entspricht. Die verbleibende Niederschlagsmenge kann an der Oberfläche der Substratschicht über Kapillarleitung aufgesaugt werden.

Die Farbgebung der Dächer ist je nach Bepflanzungsdichte grün bis braun. Dies lässt zunächst auf eine hohe Strahlungsabsorptionszahl der Dachoberflächen zwischen etwa 0,6 und 0,8 schließen. Da die Deckschichten thermisch sehr träge sind, bleibt der Einfluss der kurzfristigen nächtlichen Unterkühlung aufgrund der Strahlungsemission nur gering. Bild 8 stellt den Verlauf der Temperatur unter der Kiesschicht von Dach 5 mit Berücksichtigung der langwelligen Emission ($\varepsilon = 0{,}9$) und ohne Berücksichtigung der Emission ($\varepsilon = 0$) im Vergleich zu den gemessenen Werten dar. Es zeigt sich, dass der Einfluss der langwelligen Strahlungsemission tatsächlich vernachlässigbar gering ist. Da zudem das zu entwickelnde Gründachmodell auch auf andere Standorte übertragbar sein soll, jedoch häufig keine gemessenen Gegenstrahlungsdaten zur Verfügung

stehen, werden die Simulationen ohne direkte Berücksichtigung der Strahlungsemission durchgeführt – die langwellige Abstrahlung wird stattdessen im Mittel über eine Reduktion der kurzwelligen Strahlungsabsorption mit erfasst.

Bei der Nachberechnung des Gründachaufbaus in Holzkirchen kann eine gute Übereinstimmung mit den Temperaturmesswerten nur erzielt werden, wenn die Strahlungsabsorptionszahlen im Bereich zwischen 0,3 und 0,4 variiert werden, was eigentlich einer recht hellen Oberfläche entspricht. Diese niedrigen Werte können nicht nur auf die implizit mit berücksichtigte langwellige Strahlungsemission zurückgeführt werden, vielmehr scheinen sie auch zu bestätigen, dass ein signifikanter Teil der Strahlung an den Oberflächen der Pflanzen absorbiert wird und die Wärme von da aus nur teilweise an die eigentliche Substratoberfläche weitergegeben wird.

Bild 9 zeigt die Temperaturen unter der Kiesschicht von Dach 5 für den Messzeitraum vom 1. April 1995 bis zum 1. April 1996. Die schwarze Kurve stellt dabei die gemessenen Werte dar, die rote Kurve die berechneten Werte mit Annahme einer kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl von 0,4. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung von Messung und Berechnung über den gesamten Messzeitraum. Im Winter kommt es allerdings zu Abweichungen zwischen Messung und Berechnung, da die Schneedecke bei der Simulation nicht berücksichtigt werden kann. Eine genauere Auswertung ergibt für das Gesamtjahr eine in der Berechnung im Mittel um -0,37 K niedrigere Temperatur bei einer Abweichung von –0,84 K im Sommer und --1,13 K im Winter. In Bild 10 und Bild 11 sind die Monate Juni / Juli und August / September 1995 noch einmal genauer dargestellt. Dies zeigt nochmals, dass die berechneten Temperaturen – wie oben schon beschrieben – etwas niedriger liegen als die gemessenen Temperaturen, die Übereinstimmung jedoch ansonsten gut ist.

Die Material- und Übergangsparameter wurden jeweils iterativ so angepasst, dass insgesamt eine möglichst optimale, aber auf der sicheren Seite liegende Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung erzielt wird. Die für die Berechnungen verwendeten Materialkennwerte der Substratschicht sind in Tabelle 2 dargestellt.

3.2 Freilandversuche der MFPA in Leipzig

Anhand weiterer Freilandversuche zu begrünten Holzdachkonstruktionen an der Gesellschaft für Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen (MFPA) in Leipzig [2] besteht die Möglichkeit, die Materialdaten der Substratschicht sowie die Randbedingungen für das Gründachmodell an einem weiteren Standort mit vor allem deutlich geringeren Niederschlagsmengen zu validieren. Ziel ist es, den starken Einfluss der Feuchte auch auf das thermische Verhalten des Substrats in der Simulation möglichst genau zu erfassen und in der Folge den Aufbau auf beliebige Außenklimabedingungen und Unterkonstruktionen übertragen zu können.

Die Versuche wurden an einer einschaligen Flachdachkonstruktion auf dem Freilandversuchsgelände der MFPA Leipzig GmbH durchgeführt. Dabei wurden vier Gründachaufbauten untersucht, welche sich im verwendeten Dämmmaterial und in der innenseitigen Beplankung unterschieden. Das Versuchsgebäude ist in Bild 12 abgebildet. Die oberseitige Beplankung bestand aus einer 22 mm

dicken OSB-Platte, welche mit einer erhöhten Bauteilfeuchte von 12 M.-% eingebaut wurde. Die darunter liegende 220 mm dicke Dämmschicht wurde mit Mineralwolle und Zellulosedämmung ausgeführt. An der Innenseite wurde neben der feuchtevariablen Dampfbremse (proclima INTELLO®) eine 15 mm dicke OSB-Platte angeordnet. Den Abschluss bildete eine schwarze PVC-Dachbahn und ein 80 mm dicker extensiver Gründachaufbau, bestehend aus Schutzvlies, Leichtsubstrat und Sedum. Die vier verschiedenen Aufbauten sind in Tabelle 3 noch einmal übersichtlich aufgelistet.

Messtechnisch erfasst wurde die Temperatur unter der Substratschicht zwischen der PVC-Abdichtungsbahn und der oberseitigen Beplankung sowie Temperatur und relative Feuchte auf der kalten Seite der Dämmschicht. Des Weiteren wurde auch die Holzfeuchte in der Tragkonstruktion und in der oberseitigen Beplankung gemessen. Über den Untersuchungszeitraum wurde zudem das Raumklima (Temperatur und relative Luftfeuchte) und alle für eine hygrothermische Simulation notwendigen Umgebungsklimabedingungen wie Temperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Globalstrahlung und Niederschlagsmenge aufgezeichnet.

Die Nachrechnungen wurden an dem Versuchsfeld 3.1 (mit Zellulosefaserdämmung und innenseitiger OSB-Platte) durchgeführt. Hierzu lagen Messdaten von Januar 2008 bis April 2010 vor. Da der Standort Leipzig im Vergleich zu Holzkirchen trockener ist, wurden auch hier noch mal die wesentlichen Parameter variiert, um die Eignung der bisherigen Anpassung auch bei weniger Niederschlag zu überprüfen. Im Folgenden sind Berechnungen der Temperatur unter der Deckschicht mit Variation einzelner Parameter exemplarisch dargestellt. Bild 13 vergleicht für die Monate April und Mai 2008 die Berechnung für zwei Rohdichten (1500 kg/m³ und 2000 kg/m³) mit den Messwerten. Dabei zeigt sich, dass die Variation der Rohdichte hier nur einen geringen Einfluss hat. Da die Berechnung mit einer Rohdichte von 1500 kg/m³ bei größerer Amplituden bezüglich deren Maximalwerten etwas mehr auf der sicheren Seite liegt, wird diese bereits für die Nachrechnung in Holzkirchen verwendete Rohdichte beibehalten. Für den gleichen Zeitraum ist in Bild 14 der Vergleich unterschiedlicher Werte für die freie Wassersättigung (300 kg/m³ und 700 kg/m³) mit den Messdaten dargestellt. Da eine freie Wassersättigung von 700 kg/m³ eine zu große Trägheit der feuchten Substratschicht bewirkt, stimmen Messung und Rechnung mit einem Wert von 300 kg/m³ besser überein. Dieser Wert wurde auch bei der Anpassung am Standort Holzkirchen verwendet. Bild 15 zeigt die Ergebnisse zweier Berechnungen, einmal mit einer Quelle in der Substratschicht und einmal ohne Ansetzen einer Quelle, im Vergleich zu den Messwerten für die Monate September / Oktober 2008. Der Zeitraum, in dem kein Regen fällt, ist im Diagramm mit einem blauen Balken gekennzeichnet. Während der trockenen Periode verlaufen die beiden Berechnungskurven identisch. In den Zeiträumen, in denen Regen fällt, ist die Übereinstimmung von Messung und Berechnung mit einer Quelle in der Substratschicht deutlich besser, da ohne die Anordnung der Quelle aufgrund der insgesamt geringeren Verdunstungskühlung zu hohe Temperaturen erreicht werden. Auch die Variation des Wärmeübergangskoeffizienten zeigt, dass die in Holzkirchen getroffene Annahme von 19 W/m²K auch in Leipzig die beste Übereinstimmung zeigt (Bild 16). Denn gerade tagsüber ergeben sich mit einem niedrigeren Wärmeübergangswiderstand (10 W/m²K), welcher sich theoretisch wegen der geringer bewegten Luftschicht

zwischen den Pflanzen einstellen müsste, zu hohe Maximaltemperaturen. Anders als bei der Anpassung am Standort Holzkirchen ergibt sich in Leipzig die bessere Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung mit einer noch niedrigeren kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl von 0,3 (Bild 17). Ein Grund dafür könnte sein, dass die Pflanzendeckschicht auf dem Dach in Holzkirchen nur gering ausgebildet und in großen Teilen der Dachfläche das dunklere Substrat sichtbar war. Da mit einem Wert von 0,4 in Leipzig tagsüber unter der Substratschicht höhere Temperaturen als in der Messung erreicht werden, wird für den Modellansatz in den folgenden Berechnungen einheitlich der Wert von 0,3 verwendet. Dies ist auch deswegen sinnvoll, weil eine nicht deckende Bepflanzung bei einem solchen Dach einen allenfalls vorübergehenden Zustand darstellen sollte.

Demzufolge erfolgt die Nachrechnung der unterschiedlichen Gründachaufbauten in Leipzig mit denselben Materialkennwerten wie schon zuvor am Standort Holzkirchen, lediglich mit der reduzierten kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl von 0,3. Bild 19 zeigt den Vergleich der berechneten mit den gemessenen Temperaturen unter der PVC-Dachabdichtung des Versuchsfeldes 3.1 am Standort Leipzig über den Messzeitraum von Januar 2008 bis April 2010. Mit Ausnahme der Messausfälle und der Zeitpunkte, in denen Schnee lag, zeigt sich eine gute Übereinstimmung über den Berechnungszeitraum. Bild 19 stellt einen Ausschnitt von Januar 2008 bis März 2009 genauer dar – hier beträgt die mittlere Differenz zwischen Berechnung und Messung -0,49 K im Gesamtjahr, 0,26 K im Sommer und -0,15 K im Winter. Bild 20 und Bild 21 stellen den Vergleich für die Monate April / Mai und Oktober / November noch einmal detaillierter dar. Es zeigt sich wie angestrebt eine gute und wiederrum etwas auf der sicheren Seite liegende Übereinstimmung. Bild 22 zeigt den Wassergehalt in der oberseitigen Beplankung (OSB-Platte) des Versuchsfeldes 3.1. Der Vergleich mit den berechneten Holzfeuchten zeigt, dass sich – abgesehen von Messausfällen – ein praktisch analoger Verlauf zwischen Rechnung und Messung einstellt. Die maximalen Holzfeuchten steigen dabei von 13 M.-% im ersten, über 16 M.-% im zweiten, auf etwa 17,5 M.-% im dritten Winter.

3.3 Freilandversuche der Holzforschung Austria in Wien

Auch am Standort Wien wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes der Holzforschung Austria [40] die hygrothermischen Verhältnisse, die sich unter einer Dachbegrünung einstellen, erfasst.

Im Zuge des Forschungsprojekts wurden insgesamt 15 Flachdachaufbauten bezüglich ihrer hygrothermischen Verhältnisse untersucht. Dabei wurden auf einem Versuchsgebäude neun unterschiedliche Dachvarianten errichtet, auf einem zweiten, verschatteten Versuchsgebäude noch einmal sechs Flachdachaufbauten. Unter den neun unverschatteten Aufbauten war der in Bild 23 dargestellte Gründachaufbau.

Der Aufbau besteht raumseitig aus einer 15 mm dicken MDF-Platte sowie einer feuchtevariablen Dampfbremse (proclima INTELLO®) und auf der Außenseite aus einer 18 mm dicken OSB-Platte. Als Dämmung diente Glaswolle mit einer Dicke von 28 cm. Auf der OSB-Platte befindet sich eine Abdichtungsbahn und

darüber eine 8 cm dicke Substratschicht. Der Aufbau ist in Tabelle 4 noch einmal genauer angegeben.

Gemessen wurden neben der Temperatur und relativen Feuchte an der Außen- und Innenseite der Dämmschicht auch die Temperatur unter der Substratschicht sowie das Klima im Innenraum des Versuchsgebäudes. Über den Messzeitraum von Februar 2008 bis Juli 2009 lagen zudem alle für eine hygrothermische Simulation notwendigen Klimaelemente des Außenklimas vor.

Dem IBP standen die Messdaten von Mai 2008 bis Juli 2009 zur Verfügung. Bild 24 zeigt die gemessenen Temperaturen unter der Substratschicht (schwarz) und die Berechnung mit dem für die Standorte Holzkirchen und Leipzig angepassten Ansatz des Gründachmodells. Am Standort Wien ist die Übereinstimmung von Messung und Rechnung mit einer Abweichung von nur -0,02 K im Jahresmittel (bei -0,55 K im Sommer und 0,46 K im Winter) noch besser als an den anderen bisher untersuchten Standorten. Bild 25 zeigt den Vergleich zwischen Messung und Berechnung für die Monate August und September 2008. Die Temperaturen unter der Substratschicht lassen sich bei leicht niedrigeren Werten qualitativ und quantitativ gut nachrechnen. In Bild 26 ist der Vergleich für die Monate Februar und März dargestellt. Hier zeigt sich nur Mitte Februar eine deutliche Abweichung zwischen Messung und Berechnung, was wiederum auf die in diesem Zeitraum auf dem Dach liegenden Schneeschicht zurückzuführen ist, welche bei der Berechnung wie bereits erwähnt nicht abgebildet werden kann.

3.4 Freilandversuche des ZUB in Kassel

Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, wurden am Standort des Zentrums für Umweltbewusstes Bauen (ZUB) in Kassel ebenfalls verschiedene Gründachaufbauten untersucht. Das Ziel dieses Forschungsprojektes war es, fundierte Grundlagen für eine praxisgerechte Bewertung von Gründächern zu schaffen, da deren Einfluss auf den Wärmehaushalt von Gebäuden derzeit bei den bauordnungsrechtlichen Nachweisen nicht angesetzt werden kann [1].

Der Gründachversuchsaufbau besteht aus sechs Feldern mit unterschiedlichen Dämmschichtdicken sowie verschiedenen Vegetationsschichten. Diese bilden den oberen Abschluss von Versuchskammern, die auf dem Dach des ZUB in Kassel errichtet wurden. Die Temperaturen wurden an zwei Positionen in der Dämmung (unten, mittig) sowie an drei Stellen in der Substratschicht (unten, mittig, oben) gemessen. Ebenso wurden das Innenklima sowie alle notwendigen Außenklimaelemente über den Messzeitraum aufgezeichnet.

Die Aufbauten der sechs Versuchsfelder (fünf Gründächer und ein Referenzfeld mit dunkler Dachbahn) sind in Tabelle 5 dargestellt. In Bild 27 ist eines der Gründach-Versuchsfelder abgebildet. Nachgerechnet wurde exemplarisch der Aufbau „Feld II“ mit einer 2 cm dicken Vegetationsmatte und einer 8 cm dicken Substratschicht über einer Dachabdichtung, einer 20 cm dicken Dämmung sowie innenseitiger Dampfbremse (s_d = 100 m) und Holzschalung. Bild 28 vergleicht die gemessenen und berechneten Temperaturen unter der Substratschicht. Werden die zahlreichen Messausfälle (sowohl bei der Temperaturmessung als auch im Außenklima) außer Acht gelassen, ist eine qualitativ wiederum sehr gute Übereinstimmung, quantitativ aber im Vergleich zu den

anderen Standorten vor allem kurzfristig ein eher stärker abweichender Verlauf festzustellen. Dies wird auch bei einer näheren Betrachtung einzelner Monate deutlich: Bild 29 stellt die Monate Juni und Juli, Bild 30 die Monate Oktober und November genauer dar.

4 Neue Labor- und Freilandversuche am IBP zur Entwicklung eines spezifischen Berechnungsmodells für Dachbegrünungen

4.1 Freilandversuch - Versuchsaufbau und messtechnische Erfassung

Beim Projektauftakttreffen des projektbegleitenden Ausschusses am 1. Dezember 2012 wurde beschlossen, dass am Standort Holzkirchen vier neue Versuchsfelder mit unterschiedlichen Substrattypen und -dicken errichtet werden sollen. In Erweiterung zu den Angaben im Projektantrag sollen nicht nur ergänzende Messungen an Dachbegrünungen zur genauen Ermittlung von Strahlungsabsorptionszahlen und Wärmeübergang durchgeführt werden, sondern es werden sowohl die Temperaturen in unterschiedlichen Höhen als auch die Holzfeuchte unter der Substratschicht gemessen. Grund dafür war, dass die meisten der bisher vorliegenden Messdaten von Gründächern stammen, die ohne Dränschichten erstellt wurden. Auf Basis der Marktzahlen der Fa. Optigrün werden hingegen etwa 80 % der Gründächer mit Dränschichten ausgeführt, davon wiederum etwa 70 % mit Dränelementen und etwa 30 % mit Schüttgut.

Die Versuchsfelder mit einer Abmessung von 1,8 m auf 1,8 m konnten noch direkt vor dem ersten Wintereinbruch – am 16. Dezember 2012 – auf dem 2 ° geneigten Versuchsdach aufgebaut. Die Anordnung der Versuchsfelder auf dem Versuchsdach ist in Bild 31 dargestellt. Für die Aufbauten lieferte die Fa. Optigrün die benötigten Materialien und koordinierte den Einbau. Die Versuchsflächen wurden auf der bereits bestehenden Dachkonstruktion erstellt. Diese setzt sich aus einer 20 cm dicken Betonfertigteildecke, einer Dampfsperre und einer 4 cm dicken EPS-Dämmung zusammen. Darauf befindet sich im einen Fall eine 10 cm dicke EPS-Zusatzdämmung (Dachaufbau 1 und 2), im anderen Fall eine 10 cm dicke organisch gebundene Schüttung (Dachaufbau 3 und 4). Das bestehende Dach ist mit einer Dachbahn abgedichtet. Beim Projektauftakttreffen wurden folgende vier Versuchsaufbauten festgelegt:

- Beim Dachaufbau 1 wird das Optigrün-Extensiv-Einschichtsubstrat Typ M (Wasserkapazität etwa 20 %) mit einer Dicke von 8 cm verwendet, welches als Drän- und Vegetationsschicht dient. Darauf wird eine Vegetationsmatte mit neuer Begrünung (Sedum) gelegt.

- Beim Dachaufbau 2 handelt es sich um einen zweischichtigen Aufbau mit einer Festkörperdränage (2,5 cm) und einem 3 cm dicken Optigrün-Leichtsubstrat Typ L (Wasserkapazität etwa 39 %) als Vegetationstragschicht. Eine Vegetationsmatte mit neuer Begrünung (Sedum) bildet auch hier den Abschluss

- Dachaufbau 3 besteht aus drei Schichten – 10 cm Optigrün-Extensiv-Mehrschichtsubstrat Typ E (Wasserkapazität etwa 35 %), Filtervlies und Festkörperdränage (4 cm). Der Abschluss erfolgt mit einer Vegetationsmatte mit neuer Begrünung (Sedum).

- Dach 4 hat denselben Aufbau wie Dach 3, nur mit einer eingewachsenen, durchwurzelten, etwa 10 Jahre alten Vegetationsschicht (ebenfalls

Optigrün-Extensiv-Mehrschichtsubstrat Typ E, aber bereits durchwurzelt).

Die detaillierten Konstruktionsaufbauten sind in Tabelle 6 aufgelistet. Bild 32 bis Bild 35 zeigen jeweils schematisch den Aufbau der einzelnen Konstruktionen und stellen die genauen Positionen der installierten Temperatur- und Feuchtesensoren (Draufsicht und Querschnitt) dar. Beim Dachaufbau 1 wird die Temperatur unter der Vegetationsmatte, in der Mitte der Substratschicht sowie unter dem Schutz- und Speichervlies gemessen. Im Dachaufbau 2 wird aufgrund der geringen Dicke der Substratschicht die Temperatur nur in zwei Höhen gemessen: unter der Vegetationsmatte sowie unter dem Schutz- und Speichervlies. Bei den Dachaufbauten 3 und 4 erfolgt die Temperaturmessung unter der Vegetationsmatte bzw. unter dem eingewachsenen Substrat, auf dem Filtervlies sowie unter dem Schutz- und Speichervlies. Die Erfassung der Temperaturen erfolgt jeweils alle 60 Minuten. Da eine Messung der relativen Feuchte im meist feuchtegesättigtem Substrat ungenau und technisch sehr anfällig ist, wird die Feuchte bei allen Aufbauten unter dem Schutz- und Speichervlies indirekt über Widerstandsmessungen an dünnen Holzplättchen erfasst – dabei handelt es sich allerdings nur um eine qualitative Information, die dazu dienen soll, ein evtl. Austrocknen des Substrats im Sommer anzuzeigen. Bei Werten über 25 M.-% ist eine quantitative Angabe der Feuchten kaum möglich. Die Messwerterfassung erfolgt hier manuell einmal wöchentlich bzw. nach längeren trockenen Perioden. Eine genauere Erfassung der Feuchte in der Substratschicht ist nur durch Wägung des Substrats möglich. Hierzu wurde ein Bereich in jedem Versuchsfeld in Form eines herausnehmbaren Drahtkorbes zur manuellen Wägung hergestellt. Hier erfolgt die Messung unregelmäßig nach längeren trockenen Perioden. Die Messwerte von Temperatur und Holzfeuchte werden seit dem 26. Januar 2012 aufgezeichnet.

In Anlage 1 sind sowohl Fotos von der Erstellung als auch von der zeitlichen Entwicklung der Versuchsfelder abgebildet.

Die Wetterstation auf dem Freilandversuchsgelände des IBP in Holzkirchen erfasst alle für eine Simulation notwendigen Klimaelemente wie Temperatur, relative Feuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Niederschlag, Globalstrahlung, Diffusstrahlung sowie atmosphärische Gegenstrahlung. Zusätzlich wird an der Innenoberfläche des Versuchsdaches die Oberflächentemperatur gemessen.

Bild 36 zeigt im oberen Diagramm die Außenlufttemperatur und die relative Luftfeuchte vom 01. Februar 2012 bis 01. Februar 2013 am Standort Holzkirchen. In diesem Zeitraum erreichte die Temperatur Werte von etwa -22 °C Anfang Februar 2012 bis maximal etwa 32 °C Ende August. Die relative Feuchte im Außenklima schwankt zwischen 20 % und 100 %. Das untere Diagramm stellt den Verlauf der Innenoberflächentemperatur über denselben Zeitraum dar. Diese liegt zwischen 8 °C und 26 °C. In Bild 37 ist oben die gemessene stündliche Niederschlagsmenge und unten die Globalstrahlungssumme pro Stunde im Messzeitraum dargestellt.

Bild 38 bis Bild 41 stellt die in den verschiedenen Gründachaufbauten gemessenen Temperaturen dar. Es wurden pro Aufbau die Temperaturen an zwei Positionen (Nord-Ost und Süd-West) sowie in zwei bzw. drei Höhen gemessen.

Bild 38 zeigt die Temperaturen von Dachaufbau 1 getrennt für die drei verschiedenen Höhen – direkt unter der Vegetationsmatte („Oben"), in der Mitte der Substratschicht („Mitte") und unter dem Schutz- und Speichervlies („Unten"). Dabei schwanken die Temperaturen „Oben" zwischen -21 °C und 38 °C und liegen damit maximal etwa 6 K wärmer als die Außenluft, während z.B. bei Dachbahnen bis zu 40 K oder 50 K höhere Temperaturen erreicht werden. In der „Mitte" der Substratschicht – etwa 4 cm unter der Substratoberfläche - liegen die Temperaturen zwischen -20 °C und 35 °C und „Unten" zwischen -19 °C und 34 °C.

Im Dachaufbau 2 (Bild 39) wurde die Temperatur aufgrund der geringen Aufbaudicke nur in zwei Höhen gemessen – ebenfalls direkt unter der Vegetationsmatte („Oben") und unter dem Schutz- und Speichervlies („Unten"). Hier werden an der Oberseite Minimalwerte von etwa -24 °C und Maximalwerte von etwa 41 °C erreicht. An der Unterseite zeigen die Messwerte Temperaturen von -20 °C bis 38 °C. Durch die mit nur 3 cm sehr geringe Aufbaudicke ist auch die thermische Trägheit von Dachaufbau 2 deutlich geringer im Vergleich zu den anderen Aufbauten, was zur Folge hat, dass die Temperaturschwankungen an beiden Messpositionen extremer sind.

Bild 40 zeigt die gemessenen Temperaturen des Dachaufbaus 3. Auch hier wurde die Temperatur direkt unter der Vegetationsmatte („Oben"), zwischen der Substratschicht und dem Filtervlies („Mitte") und auf dem Schutz- und Speichervlies („Unten") gemessen. Die Temperaturen schwanken zwischen -21 °C und 40 °C „Oben", -20 °C und 32 °C „Mitte" und -16 °C und 30 °C „Unten". Dachaufbau 3 wird damit an der Oberfläche ähnlich warm wie Dachaufbau 1, an der Unterseite stellen sich jedoch aufgrund der größeren Substratschichtdicke geringere Temperaturen ein.

Im Dachaufbau 4 (Bild 41) wurden die Temperaturen ebenfalls in drei Höhen gemessen. Die Positionen „Mitte" und „Unten" sind dabei identisch wie zuvor – die Position „Oben" liegt allerdings etwas tiefer als bei den anderen Dächern, da die Grasnaben infolge der Durchwurzelung nur zusammen mit einem Teil der Substratschicht abgenommen und auf das Versuchsdach übertragen werden konnten. Die Temperaturen schwanken hier zwischen minimal -18 °C und maximal 32 °C. Da diese Messfühler wie bereits beschrieben etwa 4 cm unter der Substratoberfläche liegen, bleiben die Temperaturen entsprechend kühler als bei der oberen Messposition im ansonsten identischen Dachaufbau 3. In der „Mitte" liegen die Temperaturen zwischen -18 °C und 31 °C und „Unten" zwischen -15 °C und 30 °C.

In Bild 42 ist für Dachaufbau 1 (rote Kurven) und 3 (blaue Kurven), die sich nur durch Substrattyp und zusätzliche Dränschicht unterscheiden, das gleitende Monatsmittel der Temperaturen oben unter der Vegetationsmatte im Vergleich zur Außenluft dargestellt. Die gleitenden Monatsmittelwerte der gemessenen Temperaturen liegen in den warmen Monate und im Winter über denen der Außenluft. In den Übergangszeiten hingegen ergeben sich in der Außenluft und unter der Vegetationsmatte nur geringe Unterschiede. Ein Vergleich der Messwerte untereinander zeigt, dass die Messpositionen SW und NO bei Dachaufbau 1 um maximal 1 K voneinander abweichen, während bei Dachaufbau 3 vor allem im Sommer bis zu 2 K Unterschied erreicht werden.

Dabei fällt auf, dass die Position SW im Winter bei beiden Dächern etwa 1 K unter der Messkurve NO liegt – im Sommer dann aber bei Dach 3 die Position NO 2 K wärmer, bei Dach 1 dagegen bis 0,5 K kälter bleibt als die Position SW. Ein eindeutiger Zusammenhang zur Deutung der unterschiedlichen Messwerte ist daher kaum herstellbar. Bild 43 zeigt den selben Temperaturvergleich unten unter dem Schutz- und Speichervlies. Hier liegen die Temperaturen von Dachaufbau 1 im Sommer über und im Winter unter den Temperaturen von Dachaufbau 3, was durch den insgesamt dickeren Gründachaufbau (dickere Substratschicht und zusätzliches Dränelement) erklärt werden kann. Vor allem in den besonders warmen und kalten Monaten macht sich die größere thermische Trägheit und zusätzliche Dämmwirkung der dickeren Substratschicht bemerkbar. Zwischen den Messpositionen SW und NO ist der Unterschied bei beiden Varianten gering.

In Bild 44 und Bild 45 sind die Temperaturen (gleitendes Monatsmittel) von Dachaufbau 3 und 4 im Vergleich zur Außentemperatur dargestellt – zum einen unter der Substratschicht (oberhalb des Dränelements) und zum anderen unter dem Schutz- und Speichervlies (unterhalb des Dränelements). In Dachaufbau 4 liegt das Temperaturniveau nur zeitweise und geringfügig höher als in Dachaufbau 3 – der sich einstellende Temperaturunterschied zwischen den eigentlich doch recht unterschiedlichen Pflanzdeckschichten bleibt damit geringer als erwartet.

Die unter der Substratschicht gemessenen Holzfeuchten sind in Bild 46 dargestellt. Pro Dachaufbau wurden zwei Fühler jeweils an der Position des unteren Temperaturfühlers verlegt. Die Holzfeuchten wurden unter Berücksichtigung des jeweiligen Temperaturniveaus aus dem Messsignal errechnet. Anfang Februar 2012 fallen die gemessenen Feuchtewerte in allen Versuchsdächern auf Werte um ca. 20 M.-%. Dies könnte ggf. auf die zu diesem Zeitraum extrem niedrigen Temperaturen zurückzuführen sein, da eine Austrocknung der Dächer in Anbetracht der sonstigen Randbedingungen auszuschließen ist. Ansonsten liegen die Holzfeuchten bis auf wenige Einzelmessungen ständig im sehr hohen Feuchtebereich über 30 M.-%. Dabei ist weder bei den beiden Messpunkten (SW, NO) der einzelnen Dachvarianten noch in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Substratdicken (schnellere Trocknung bei dünnem Substrat) eine klare Tendenz erkennbar. Die Messungen bestätigen allerdings die bereits erwähnte Annahme, dass unter den Gründachaufbauten ganzjährig ein hohes Feuchteniveau herrscht und die Substrate nicht oder höchstens lokal und kurzfristig austrocknen.

Bild 47 zeigt die Messwerte von der Wägung der in die Begrünung integrierten Substratkörbchen. Diese erfolgten unregelmäßig jeweils nach einer längeren trockenen Periode. Mitte August mit Temperaturen bis zu 32 °C wurde die Messung häufiger durchgeführt, da hier am ehesten eine „Durchtrocknung" des Substrats zu erwarten war. Hier ist zwar eine Gewichtsabnahme erkennbar, da das Substrat unterseitig aber immer noch feucht war, ist eine vollständige Austrocknung wohl nicht erfolgt – wobei mit „trocken" hier jeweils ein Zustand gemeint ist, bei dem kein flüssiges Wasser mehr erkennbar ist. Dies wird auch durch das zum Projektende ermittelte Trockengewicht der einzelnen Proben bestätigt – der niedrigste Messwert im August liegt bei allen Dächern zwischen 11 und 18 M.-% über dem Trockengewicht. Zur Ermittlung des

Trockengewichts (für die verschiedenen Substrate als Linien in Bild 47 dargestellt) wurden die Substratkörbchen im Klimaschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet.

4.2 Messung der Substratkennwerte im Labor

Bei den Versuchsaufbauten am Standort Holzkirchen wurden vier verschiedene Substrate der Fa. Optigrün eingebaut. Für die Nachrechnung der Freilanduntersuchungen werden die Materialdaten im Labor des IBP bestimmt.

Bezeichnung der vier Substrattypen:

- Extensiv-Einschichtsubstrat Typ M
- Leichtsubstrat Typ L
- Extensiv-Mehrschichtsubstrat Typ E (neu)
- Extensiv-Mehrschichtsubstrat Typ E (ausgebaut, durchwurzelt)

Zusätzlich zu den Herstellerangaben sind folgende Materialkennwerte erforderlich um Feuchtespeicherung und –transport (Diffusion und Flüssigtransport) möglichst genau beschreiben zu können:

- Rohdichte (lufttrocken)
- Diffusionswiderstand
- Wasseraufnahmekoeffizient
- Sorptionsfeuchte bei 50 %, 80 %, 93 % und 97 % relativer Luftfeuchte
- freie Wassersättigung

Die Ergebnisse der Labormessungen für die vier Substrate sind in Tabelle 7 bis Tabelle 10 dargestellt.

Rohdichte

Die Rohdichte wird durch Wiegen des Materials im lufttrockenen Zustand bestimmt.

Diffusionswiderstand

Für die Bundesrepublik Deutschland ist die Durchführung der Messung von Dampfdiffusionskoeffizienten gemäß DIN EN 12572 [41] genormt. Die Messung des Diffusionswiderstands der Substrate erfolgt mittels des Feuchtbereichsverfahrens (Wet-Cup-Verfahren), eine Bestimmung im Dry-Cup-Verfahren ist nicht notwendig, da sich die Substrate im realen Aufbau immer im Feuchtbereich befinden. Dabei wird das Material in die offene Seite eines Prüfgefäßes eingebracht, das eine wässrige Salzlösung enthält, wodurch sich im Prüfgefäß eine relative Feuchte von etwa 93 % einstellt. Seitlich wird die Anordnung mittels geeigneter Materialien so abgedichtet, dass der entstehende Diffusionsstrom nicht durch etwaige Undichtigkeiten verfälscht wird. Das Prüfgefäß wird

dann in eine Klimakammer mit einer relativen Feuchte von 50 % eingebracht. Durch das entstehende Partialdruckgefälle stellt sich ein Feuchtetransport vom Prüfgefäß zur Klimakammer ein. Über die in regelmäßigen Abständen erfolgende Wägung des Versuchsaufbaus lässt sich die Gewichtsabnahme feststellen und so der Diffusionsstrom und der Diffusionswiderstand der Materialprobe ermitteln. Bild 48 zeigt exemplarisch am „Leichtsubstrat Typ L“ den Versuchsaufbau zur Bestimmung des Diffusionswiderstandes.

Wasseraufnahmekoeffizient

Der Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) beschreibt die Feuchteaufnahme eines Materials über die Benetzungsfläche. Zur Bestimmung des w-Werts nach DIN EN ISO 15148 [42] werden die Proben an den Seitenflächen abgedichtet und mit der Saugfläche nach unten 2 bis 10 mm tief in ein Wasserbad eingetaucht. Die Substrate werden dazu in kurze PVC-Rohre mit einem durchlässigen Vlies an der Unterseite eingefüllt. In Bild 49 ist dieser Versuchsaufbau abgebildet. Das obere Bild zeigt die Materialprobe vor dem Kontakt mit Wasser, im unteren Bild hat sich diese bereits vollständig mit Wasser von unten vollgesaugt. Die Proben werden vor dem Eintauchen in das Wasserbad und dann in gewissen Zeitabständen gewogen. Trägt man die flächenbezogene Wasseraufnahme über der Wurzel der Zeit auf, kann aus der Steigung der Geraden der Wasseraufnahmekoeffizient ermittelt werden. Der Wasseraufnahmekoeffizient beschreibt nur die Wasseraufnahme eines Baustoffes über die Oberfläche, nicht aber die Verteilung des Wassers innerhalb des Materials. Mit Hilfe von Kapillartransportkoeffizienten, deren messtechnische Bestimmung aber einen hohen apparatetechnischen Aufwand bedeutet [43], lassen sich für die Wasseraufnahme die Feuchteverteilung berechnen. Diese für hygrothermische Berechnungen wesentlichen Transportkoeffizienten können mit guter Näherung auch aus Standardstoffkennwerten (w-Wert, freie Wassersättigung und Bezugsfeuchtegehalt) approximiert werden [44].

Trocknungsversuch

Der w-Wert kann nur die Wasseraufnahme beschreiben. Der Flüssigtransport beim Trocknungsvorgang läuft im Allgemeinen deutlich langsamer ab. Für diesen Transportvorgang existiert kein Kennwert vergleichbar dem w-Wert. Aus diesem Grund muss zusätzlich ein Trocknungsversuch durchgeführt werden. Dazu werden die gesättigten Proben neben der seitlichen Abdichtung auch an der Unterseite abgedichtet und in einem Klimaraum bei konstanten Randbedingungen über die freie Seite getrocknet und durch Wägung der zeitliche Gewichtsverlauf ermittelt. Aus diesem Gewichtsverlauf können unter Verwendung von WUFI® iterativ die Kapillartransportkoeffizienten für den Trocknungsvorgang ermittelt werden [45]. Der Prüfkörper im Trocknungsversuch ist in Bild 50 dargestellt. Bild 51 bis Bild 54 zeigen die Trocknungsverläufe für die vier untersuchten Substrate.

Freie Wassersättigung

Weiterhin wurde die freie Wassersättigung der verschiedenen Substrate bestimmt. Die freie Wasseraufnahme ist die gewichts- oder volumenbezogene Menge an Wasser, die ein Material bei Wasserlagerung ohne zusätzliche äußere Kräfte (Überdruck oder Vakuum) aufnimmt. Hierzu werden entsprechend

vorbereitete und gewogene Prüfkörper in ein Wasserbad, gefüllt mit Leitungswasser, auf einen Gitterrost gelegt. Die Prüfkörper werden zunächst für 1 Stunde nur bis zur Hälfte eingetaucht. Dann werden sie mit etwa 20 mm Wasser überdeckt und in regelmäßigen Zeitintervallen gewogen. Die freie Wasseraufnahme ist beendet, wenn die genormte Gewichtskonstanz erreicht ist, d. h. dass der Prüfkörper sein Gewicht in 24 Stunden um nicht mehr als 0,1 M.-% ändert. Der Versuchsaufbau ist in Bild 55 dargestellt.

Feuchtespeicherfunktion

Die Bestimmung der Feuchtespeicherfunktion (DIN EN ISO 12571 [46]) erfolgt bis etwa 97 % relativer Feuchte mittels Sorptionsmessung. Hierzu werden die Materialproben in Klimakammern mit verschiedenen relativen Feuchten bis zur Massekonstanz gelagert. Für die vier Substrate wurde die Sorptionsfeuchte bei 50 %, 80 %, 93 % und 97 % relativer Feuchte bestimmt. Die Feuchtespeicherung endet mit der zuvor beschriebenen freien Wassersättigung. In Bild 56 ist die Lagerung der Proben in einer Klimakammer mit 93 % relativer Feuchte abgebildet.

4.3 Erweiterung des Berechnungsmodells für spezifische Substrate auf Basis der Labor- und Freilandmessungen

Der in Kapitel 2 entwickelte vereinfachte Ansatz zur Berechnung von Dachbegrünungen zeigt allgemein eine recht gute Übereinstimmung mit den an verschiedenen Standorten und unter verschiedenen Begrünungstypen gemessenen Daten. Alle untersuchten Aufbauten wiesen dabei ähnlich dicke Deckschichten auf. Bei verbleibenden Abweichungen zu den Messergebnissen der verschiedenen Standorte wurde das Berechnungsmodell jeweils so angepasst, dass im Zweifel ungünstigere Ergebnisse erzielt werden als bei der Messung. Dies ist erforderlich, um bei der Planung eine Bauteils nicht auf der unsicheren Seite zu bemessen. Da für die Messungen, die dem generischen Berechnungsmodell zugrunde liegen, jeweils keine Gegenstrahlungsdaten zur Verfügung standen, wurde bei dem vereinfachten generischen Ansatz dieser Klimaeinfluss lediglich implizit mit den anderen Anpassungsparametern berücksichtigt.

Auf Basis der neuen Freilandversuche mit verschiedenen Substrattypen und -dicken, deren spezifische Eigenschaften auch im Labor bestimmt wurden, soll nun versucht werden, das generische Modell zu einem spezifischen Modell zu erweitern und dabei sowohl die genauen Materialeigenschaften, als auch die Aufbaudicke und die Strahlungsverhältnisse noch genauer zu berücksichtigen.

Die Nachrechnung der vier verschiedenen Aufbauten erfolgt mit dem hygrothermischen Simulationsprogramm WUFI®. Dabei werden die unbekannten bzw. aufgrund ihrer Komplexität nicht durch einfache Laborversuche erfassbaren Parameter variiert, um eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Bedingungen zu erreichen. Die Anpassung erfolgt dabei iterativ, sowohl was die zu adaptierenden Parameter als auch die einzelnen Messfelder betrifft, um einen möglichst eindeutigen Zusammenhang zwischen der Variation der Eingabe und deren Einfluss auf das Ergebnis zu erhalten. Da eine Darstellung

aller untersuchten Variationen zu umfangreich wäre, werden im Rahmen des Berichts nur die wichtigsten und zielführenden Iterationsschritte näher beschrieben.

Zu den noch unsicheren Parametern zählen vor allem der Strahlungsaustausch an der Oberfläche, der u.a. durch Verschattung, wechselnde Farbgebung und Variabilität der Bepflanzung beeinflusst wird, aber auch die wassergehalts-abhängige Wärmeleitfähigkeit des bepflanzten Substrats, der Einfluss der unterschiedlich gefüllten und wasserspeichernden Dränschichten und die Pflanzdeckschicht selbst, die den Wärmeübergang behindert und wie eine zusätzliche Dämmung wirkt.

Um zu berücksichtigen, dass das Niederschlagswasser nicht nur durch die Kapillarleitung vom Substrat aufgenommen wird, sondern auch durch dieses hindurchsickert bzw. -fließt, wird – analog zu dem in Kapitel 2 erläuterten generischen Berechnungsmodell – in den unteren 2 cm des Substrats zusätzlich eine Feuchtequelle angesetzt. Beim generische Modell wurden mit jeweils 40 % im Substrat und in der Kiesdränschicht gute Ergebnisse erzielt – daher werden dieser Wert zunächst auch für die hier verwendete Quelle gewählt. Die genaue Größenordnung ist dabei wenig ausschlaggebend, da die Quelle zur vollständigen Befeuchtung bei Niederschlag dient und auf die freie Sättigung des Materials begrenzt wird. Mit dieser Vorgehensweise kann – entsprechend der Feuchtemessungen an den Versuchsfeldern – eine konstant hohe Feuchte unter der Substratschicht gewährleistet werden.

Die Nachrechnungen erfolgen für den Messzeitraum vom 01. Februar bis 15. November 2012. An der Innenoberfläche werden die für diesen Zeitraum gemessenen Innenoberflächentemperaturen direkt angesetzt. Als Außenklima werden die am Freilandversuchsgelände gemessenen Klimadaten (Temperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung, Diffusstrahlung, Niederschlag, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und langwellige Gegenstrahlung) für diesen Zeitraum verwendet.

Dachaufbau 1

Bei Dachaufbau 1 handelt es sich um einen Einschichtaufbau mit einer 8 cm dicken Substratschicht (Beschreibung in Kapitel 4.1), der im Vergleich zu den anderen drei Aufbauten kein Dränelement und somit die wenigsten unsicheren Parameter aufweist. Die Anpassung an die Messwerte erfolgt dabei über die Parameter für den Strahlungsaustausches an der Oberfläche, die feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit des Substrats und die zusätzliche Pflanzdeckschicht sowie deren Wärmeübergangseigenschaften.

Bauteilaufbau von außen nach innen (Bild 32):

- 8 cm Optigrün-Extensiv-Einschichtsubstrat Typ M
- Optigrün-Schutz- und Speichervlies Typ RMS 300
- Wurzelschutzbahn
- Dampfbremse mit s_d = 50 m

- 14 cm EPS-Dämmung
- Dachbahn
- 20 cm Betondecke

Für das Substrat werden die im Labor bestimmten Kennwerte für das „Einschichtsubstrat Typ M“ verwendet. Die Wärmekapazität wird entsprechend den Angaben aus [28] mit 1000 J/(kgK) und die Wärmeleitfähigkeit – analog zum generischen Berechnungsmodell - mit 0,9 W/(mK) im trockenen und 1,5 W/(mK) im wassergesättigten Zustand angesetzt. Die Materialkenndaten der anderen Materialien werden gemäß den Herstellerangaben verwendet oder der WUFI®-Materialdatenbank entnommen. Bezüglich der Kenndaten der bestehenden Unterkonstruktion werden zusätzlich die Angaben aus älteren Versuchsdokumentationen herangezogen.

Im ersten Schritt werden die Strahlungsverhältnisse an der Oberfläche genauso berechnet, wie bei dem in Kapitel 2 beschriebenen generischen Berechnungsmodell: mit einer kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl von 0,3 und ohne langwelligen Strahlungsaustausch (keine Strahlungsemission). In Bild 57 sind die Temperaturen unter der Vegetationsmatte, also etwa 10 mm unter der Außenoberfläche dargestellt - in Grau und Schwarz die beiden gemessenen Temperaturkurven und in Rot die berechnete Temperatur. Mit diesem Ansatz können zwar die nächtlichen Minimaltemperaturen gut abgebildet werden, tagsüber bleiben die berechneten Temperaturen aber unter den gemessenen Werten. Um die Temperaturmaxima tagsüber anzuheben, erscheint es naheliegend, die Strahlungsabsorption der Oberfläche zu erhöhen. Eine generelle Erhöhung der Strahlungsabsorption führt zwar zu einer besseren Übereinstimmung der Temperaturspitzen am Tag – allerdings steigt aufgrund der hohen thermischen Trägheit der Substratschichten auch das Gesamttemperaturniveau an, so dass die Temperaturminima in der Nacht in der Folge zu hoch liegen. Hier erscheint es daher sinnvoll, die nächtliche Abkühlung mit zu berücksichtigen. Beim generischen Modell war dies mangels gemessener atmosphärischer Gegenstrahlungsdaten nicht möglich, obwohl die langwellige Abstrahlung für die Temperaturverhältnisse auf Flachdächern bekanntermaßen eine sehr wesentliche Rolle spielt. Da für den jetzigen Messzeitraum Gegenstrahlungsdaten zur Verfügung stehen, wird das Berechnungsmodell um den langwelligen Strahlungsaustausch erweitert. Dieser erscheint auch im Hinblick auf die Verwendung des Gründachmodells in anderen Klimaregionen sinnvoll: Die implizite Berücksichtigung der Abstrahlung über die geringere Strahlungsabsorption im generischen Modell ist nur dann geeignet, wenn vergleichbare Strahlungsverhältnisse wie an den untersuchten mitteleuropäischen Standorten auftreten. Andere Strahlungsverhältnisse (vor allem infolge anderer Bewölkungsgrade) können nur durch eine explizite Berechnung der langwelligen Strahlungsverluste erfasst werden.

Die Berechnung erfolgt mit einer langwelligen Strahlungsemissionszahl von 0,9 unter Berücksichtigung der expliziten Strahlungsbilanz. Die kurzwellige Strahlungsabsorption wird im realistisch erscheinenden Bereich für die begrünte Dachoberfläche zwischen etwa 0,5 und 0,7 variiert. Bild 58 zeigt, dass sich bzgl. des gleitenden Monatsmittelwerts mit einer Strahlungsabsorptionszahl von 0,7 (rote Kurve) eine beste Übereinstimmung ergibt. Allerdings ist die Amplitude der stündlichen Werte beim berechneten Temperaturverlauf größer

als in den Messungen – die meiste Zeit des Jahres liegen sowohl die berechneten Maximalwerte über als auch die berechneten Minimalwerte unter den gemessenen Werten.

Eine Erhöhung der Wärmekapazität zur Dämpfung der Temperaturamplituden erscheint in Anbetracht der Mess- und Literaturwerte für Substrate nicht gerechtfertigt. Die etwas geringeren Amplituden in der Messung könnten aber auch auf die, wie eine dünne Dämmschicht wirkende und den Wärmeübergang mit dem Außenklima behindernde Bepflanzung, zurückgeführt werden – diese ist im generischen Modell bisher ebenfalls nicht berücksichtigt.

Daher wird nun versucht, die Auswirkungen der Bepflanzung in der Berechnung genauer zu erfassen. Da durch den Bewuchs strömungsbedingt ein höherer Wärmeübergangswiderstand (kleinerer Wärmeübergangskoeffizient) an der Oberfläche wahrscheinlich ist, wird dies mit Einführen der Pflanzdeckschicht ebenfalls untersucht. Die Ergebnisse zeigen aber, dass mit einem höheren Übergangswiderstand die Temperaturen im Substrat allgemein ansteigen und zwar am Tag stärker als in der Nacht, wodurch sich die Übereinstimmung mit den Messwerten wieder verschlechtert (nicht dargestellt). Eine Kompensierung der Temperaturerhöhung wäre nur mit einer erneuten Reduktion der Strahlungsabsorption möglich, was jedoch wenig sinnvoll erscheint. Da auch bei der Entwicklung des generischen Gründachmodells eine Erhöhung des Wärmeübergangswiderstand zu ungünstigeren Ergebnissen geführt hatte, wird der Standardwert für den Übergangskoeffizienten von 19 W/(m²K) beibehalten.

Die Dämmwirkung wird bei der Berechnung durch eine zusätzliche Pflanzdeckschicht mit einer Dicke von 1 cm an der Oberfläche des Substrats berücksichtigt. Um den Feuchtehaushalt möglichst wenig zu beeinflussen werden vereinfachend die Eigenschaften des generischen Substrat verwendet und nur dessen Wärmeleitfähigkeit angepasst. Dazu werden die Werte in mehreren Iterationsschritten im trockenen Bereich von 0,9 W/(mK) auf 0,2 W/(mK) und im gesättigten Zustand von 1,5 W/(mK) auf 0,8 W/(mK) reduziert. Mit den zuletzt gewählten Werten kann eine recht gute Übereinstimmung von Berechnung und Messung unter der Vegetationsmatte sowohl bezüglich der mittleren als auch bezüglich der stündlichen Werte erzielt werden (Bild 59).

Ein Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturen an den anderen beiden Positionen in der Mitte der Substratschicht und unter dem Schutz- und Speichervlies (nicht dargestellt) ergibt allerdings immer noch eine zu große Amplitude in der Berechnung. Da die Werte in der Mitte der Substratschicht zu nahe an den Temperaturen an der Substratoberfläche liegen, erscheint es sinnvoll, die Wärmeleitfähigkeit des gesättigten Substrats gegenüber den zunächst angesetzten Werten schrittweise zu reduzieren. Mit Werten von 0,4 W/(mK) im trockenen und 1,0 W/(mK) im gesättigten Zustand wird eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an allen drei Messpositionen erzielt – unter der Vegetationsmatte (Bild 60), in der Mitte der Substratschicht (Bild 61) sowie unter dem Schutz- und Speichervlies (Bild 62).

Dachaufbau 3

Dachaufbau 3 – ein Dreischichtaufbau mit 10 cm Substrat, Filtervlies und Festkörperdränage – unterscheidet sich von Dachaufbau 1 nur durch den anderen Substrattyp sowie das zusätzliche Dränelement.

Bauteilaufbau von außen nach innen (Bild 34):

- 10 cm Optigrün-Extensiv-Mehrschichtsubstrat Typ E (neu)
- 4 cm Optigrün-Festkörperdränage Typ FKD 40
- Optigrün-Schutz- und Speichervlies Typ RMS 300
- Wurzelschutzbahn
- Dampfbremse mit s_d = 20 m
- 10 cm harzgebundenes Blähglasgranulat
- 4 cm EPS-Dämmung
- Dachbahn
- 20 cm Betondecke

Für das Substrat werden die im Labor bestimmten Kennwerte für das „Mehrschichtsubstrat Typ E (neu)" verwendet sowie die für den Dachaufbau 1 als geeignet ermittelte Wärmeleitfähigkeit von 0,4 W/(mK) im trockenen bis 1,0 W/(mK) im gesättigten Zustand. Die Wärmekapazität wird wie zuvor mit 1000 J/(kgK) angesetzt. Die Materialkenndaten der weiteren Materialien werden entsprechend älteren Versuchsdokumentationen bzw. gemäß Herstellerangaben verwendet oder der WUFI®-Materialdatenbank entnommen.

Die für Dachaufbau 1 als geeignet ermittelten Eigenschaften für die Pflanzdeckschicht und die Strahlungseigenschaften werden aufgrund der weitgehend identischen Verhältnisse unverändert übernommen. Die Anpassung der Temperaturverläufe in Dachaufbau 3 erfolgt über die Eigenschaften der – im Vergleich zu Dachaufbau 1 – hier zusätzlich verwendeten Dränschicht.

Bei der Festkörperdränage FKD 40 handelt es sich um eine 4 cm hohes Kunststoffelement (vergleichbar der Struktur eines „Eierkartons") aus recycelten Hart-Polyethylen (HDPE). Dieses kann in den oberseitigen Mulden Niederschlagswasser zurückhalten und dient somit gleichzeitig als Drän- und Wasserspeicherschicht (siehe auch Fotos in Anlage 1). Diese Schicht setzt sich im eingebauten Zustand also sozusagen aus Kunststoff, Luft und Wasser zusammen. Für die Berechnung ist es notwendig, die Eigenschaften dieser drei Materialien in einem eindimensionalen Schnitt abzubilden. Eine Kombination aus einer 2 cm dicken Luftschicht (obere luftgefüllte Hälfte des Dränelements) und einer ebenso dicken Drän- und Speicherschicht (untere Wasser gefüllte Hälfte) erschien zunächst naheliegend. Die Drän- und Speicherschicht übernimmt dabei in der Berechnung die Funktion das Niederschlagswasser zurückzuhalten und in trockenen Phasen wieder an das Substrat abzugeben – die „Befüllung" erfolgt über eine Feuchtequelle mit 40 % des Niederschlags. Die eingebrachte Menge wird dabei auf das vom Hersteller angegebene maximale Füllvolumen (hier: (8,7 kg/m²) / (0,04 m) = 217 kg/m³) begrenzt –

größere Quellmengen werden also nicht berücksichtigt, womit die Dränfunktion des Elements abgebildet ist.

Erste Berechnungen des zweischichtigen Ansatzes zeigen allerdings, dass durch die zwischen der Drän- und Speicherschicht und dem Substrat liegende Luftschicht die Feuchte nicht schnell genug an das Substrat weitergegeben wird. Daher werden die zwei Schichten zu einer kombinierten 4 cm dicken Drän- und Speicherschicht mit gemittelten Eigenschaften zusammengefasst. Die Anpassung der Wärmeleitfähigkeit erfolgt wiederum iterativ – ausgehend von etwa 0,1 W/(mK) für eine dünne Luftschicht wird die Wärmeleitfähigkeit langsam erhöht. Eine insgesamt recht gute Übereinstimmung ergibt sich mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,3 W/(mK) im trockenen und 0,9 W/(mK) im gesättigten Zustand. Für die Messposition unter dem Schutz- und Speichervlies ist der berechnete Temperaturverlauf im Vergleich zu den Messungen in Bild 63 dargestellt.

Trotz der Variation der verschiedenen unsicheren Parameter im sinnvollen Bereich bleiben die Temperaturen sowohl bei den Stundenwerten als auch im gleitenden Monatsmittel immer noch leicht erhöht gegenüber der Messung. Da das Temperaturniveau über die gesamte Aufbauhöhe weitgehend gleichmäßig zu hoch liegt, wird die Strahlungsabsorption von 0,7 auf 0,6 reduziert. Dadurch bleibt die Oberfläche etwas kälter, was sich auch auf die Temperaturen in den unteren Schichten auswirkt. Der Vergleich zwischen gemessener und berechneter Temperatur an den drei ausgewerteten Positionen ist unter der Vegetationsmatte in Bild 64, unter der Substratschicht in Bild 65 und unter dem Schutz- und Speichervlies in Bild 66 dargestellt. Im Mittel kann nun eine recht gute Übereinstimmung mit den Messwerten erzielt werden – bei den stündlichen Werten verbleiben allerdings immer noch Differenzen von teilweise bis zu 8 K (vor allem Mittags und Nachts). Dies zeigt die Differenzkurve zwischen den berechneten Werten und den gemittelten Messwerten (gelb). Die ebenfalls aufgetragene Differenzkurve zwischen den beiden Messkurven NO und SW (blau) zeigt allerdings, dass sich die am selben Dach und in derselben Tiefe erfassten Messwerte ebenfalls bis zu 6 K unterscheiden, was auf die Inhomogenität der Substrat- und Pflanzendeckschicht sowie auf ggf. lokal unterschiedliche Feuchtegehalte und Unterströmungsverhältnisse zurückzuführen ist. Diese Differenzen relativieren die zuvor beschriebenen Abweichungen zwischen Berechnung und Messung und zeigen, dass es hier keine „korrekte“ Lösung, sondern nur eine möglichst gute Annäherung an den Messbereich geben kann.

Dachaufbau 4

Der Dachaufbau 4 ist identisch zu Dachaufbau 3, allerdings kommt hier ein bereits eingewachsenes Substrat mit dichtem Bewuchs statt einer neuen Vegetationsmatte zum Einsatz.

Bauteilaufbau von außen nach innen (Bild 35):

- 10 cm Optigrün-Extensiv-Mehrschichtsubstrat Typ E (alt)
- 4 cm Optigrün-Festkörperdränage Typ FKD 40

- Optigrün-Schutz- und Speichervlies Typ RMS 300
- Wurzelschutzbahn
- Dampfbremse mit s_d = 20 m
- 10 cm harzgebundenes Blähglasgranulat
- 4 cm EPS-Dämmung
- Dachbahn
- 20 cm Betondeck

Für das Substrat werden die ebenfalls im Labor bestimmten Kennwerte für das „Mehrschichtsubstrat Typ E (alt)“ verwendet. Alle anderen Eigenschaften und Einstellungen werden entsprechend Dachaufbau 3 übernommen. Lediglich die Pflanzdeckschicht wird als 3 cm dicke Materialschicht angesetzt, um die dickere und dichtere Bepflanzung zu repräsentieren. Wie Bild 67 exemplarisch für die Position unter dem Schutz- und Speichervlies zeigt, stimmen mit diesem Ansatz zwar die gemessenen und berechneten Temperaturen im gleitenden Monatsmittel gut überein, es können aber die Minimal- und die Maximaltemperaturen noch nicht gut abgebildet werden. Die berechneten Temperaturen sind tagsüber kälter und nachts wärmer als die gemessenen Temperaturen.

Um die Amplitude der Temperaturen unter dem Schutz- und Speichervlies zu vergrößern, wird die Pflanzdeckschicht wieder auf eine Dicke von 1 cm reduziert. Mit diesem Ansatz ergeben sich für alle drei Positionen akzeptable Übereinstimmungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturverläufen. Bild 68 bis Bild 70 zeigen, dass die Berechnung die Messungen im gleitenden Monatsmittel sehr gut abbilden kann. Zudem ist die Differenzkurve zwischen Rechnung und Messung dargestellt, sowie die Differenzkurve zwischen den beiden Messpositionen dar. Anhand dieser Differenzkurven zeigt sich wiederum, dass zwar die berechneten Temperaturen teilweise noch um bis etwa 6 K von den gemessenen Temperaturen abweichen, sich aber auch zwischen den beiden Messpositionen Unterschiede bis 5 K ergeben.

Die bessere Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung mit einer nur 1 cm dicken Pflanzschicht wie bei Dachaufbau 3 zeigt, dass die Bepflanzungsdicke bzw. –dichte einen doch eher geringen Einfluss auf das Temperaturverhalten des Gründachs hat. Möglicherweise kompensieren sich auch eine geringere Strahlungsabsorption und eine etwas bessere Dämmwirkung der eingewachsenen Bepflanzung gegenseitig.

Dachaufbau 2

Bei Dachaufbau 2 kommt eine nur 3 cm dicke Leichtsubstratschicht zum Einsatz, die ebenfalls über einem Dränelement angeordnet ist, welches jedoch – anders als in Dachaufbau 3 und 4 – mit dem Leichtsubstrat verfüllt wurde. Die Bepflanzung erfolgte wiederum über eine neue Vegetationsmatte.

Bauteilaufbau von außen nach innen (Bild 33):

- 3 cm Optigrün-Extensiv-Leichtsubstrat Typ L
- 2,5 cm Optigrün Festkörperdränage Typ FKD 25 (verfüllt)
- Optigrün-Schutz- und Speichervlies Typ RMS 300
- Wurzelschutzbahn
- Dampfbremse mit s_d = 50 m
- 14 cm EPS-Dämmung
- Dachbahn
- 20 cm Betondecke

Für das Substrat werden die im Labor bestimmten Kennwerte für das „Leichtsubstrat Typ L" verwendet. Die restlichen Einstellungen werden entsprechend den Ergebnissen aus der Anpassung für Dachaufbau 1 angesetzt.

Da das hier verwendete Dränelement mit dem Leichtsubstrat verfüllt ist, sich also in den oberen Aussparungen ebenfalls Substrat befindet, werden verschiedene Ansätze zur Berücksichtigung des Dränelements untersucht. Die beste Übereinstimmung ergibt sich, wenn bei der Berechnung das Dränelement „vernachlässigt" und durch eine, entsprechend der Höhe des Dränelements, dickere Substratschicht abgebildet wird. Bild 71 und Bild 72 zeigen den Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an den beiden Messpositionen unter der Vegetationsmatte bzw. unter dem Schutz- und Speichervlies. Während sich die Temperatur direkt unter der Substratoberfläche gut durch die Berechnung abbilden lässt, liegt die Nachrechnung der Temperaturen unter dem Schutz- und Speichervlies etwas weiter auf der sicheren Seite. Bei Betrachtung der blauen Differenzkurve zeigen sich jedoch auch gewisse Abweichungen zwischen den beiden Messpositionen SW und NO. Aufgrund dieser Inhomogenität lässt sich auch eine Differenz zwischen Berechnung und Messung nicht vermeiden.

Zusammenfassung Modellansatz

Auf Basis der in Holzkirchen durchgeführten Labormessungen und Freilandversuche kann das generische Berechnungsmodell um wesentliche Punkte erweitert werden.

Es wird nun der detaillierte Strahlungsaustausch an der Oberfläche sowohl über die kurzwellige Strahlungsabsorption, als auch über die langwellige Strahlungsemission berücksichtigt. Für die langwellige Strahlungsemission wird der typische Wert von 0,9 für nichtmetallische Oberflächen angenommen – die Werte variieren hier im Bereich zwischen etwa 0,85 und 0,95 was nur sehr geringe Auswirkungen auf die Ergebnisse einer Berechnung hat. Die kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl ist im Wesentlichen abhängig von der Farbgebung der Dachoberfläche (bepflanztes Substrat) und ändert sich demnach sowohl im Jahresverlauf (z.B. starker Bewuchs im Sommer, Schnee im Winter) als auch langfristig (mit zunehmender Pflanzdichte). Da die Berücksichtigung zeitlich veränderbarer Kennwerte derzeit in der Simulation noch nicht möglich ist, wird mit einer konstanten kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl gerechnet. Da alle untersuchten Dächer auf die

gleichen Weise begrünt wurden und auch die eingewachsene Pflanzdeckschicht zu kaum anderen Ergebnissen führt als die neu aufgebrachte, wird für die Strahlungsabsorption nur ein Wert für alle Varianten ermittelt.

Nachdem sich die gemessenen Temperaturen an drei Dachaufbauten (2, 3 und 4) mit einer kurzwelligen Strahlungsabsorption von 0,6 gut nachberechnen lassen und lediglich bei Dachaufbau 1 eine etwas bessere Übereinstimmung mit einer Absorptionszahl von 0,7 gegeben ist, wird allgemein eine Absorptionszahl von 0,6 verwendet. Die Ausprägung der Bepflanzung unterscheidet sich bei Dachaufbau 1 allenfalls minimal von den anderen Varianten. Die Berechnungsergebnisse sind in Bild 73 bis Bild 75 für die drei Messpositionen dargestellt. Damit ergeben sich für Dach 1 vor allem an der Position direkt unter der Vegetationsmatte zwar etwas geringere Maximalwerte, die Abweichungen zwischen Rechnung und Messung (stündliche Werte) liegen aber etwa in der gleichen Größenordnung wie bei den anderen drei Dachaufbauten und die gleitenden Monatsmittelwerte weichen nur minimal voneinander ab.

Die Bepflanzung wird durch eine zusätzliche Pflanzdeckschicht an der Oberfläche des Substrats berücksichtigt. Diese erhöht über die zusätzliche Dämmwirkung auch den Wärmeübergang an der Oberfläche. Die unterschiedlichen Berechnungen und Messungen haben dabei ergeben, dass keine Unterscheidung zwischen der neuen und der eingewachsenen Bepflanzung erforderlich ist. Mit einer Pflanzdeckschichtdicke von 1 cm können beide Varianten gut abgebildet werden.

Zudem wurde versucht die eher komplexen Eigenschaften der Dränelemente (Kunststoffelement und variabler Anteil an Wasser und Luft) vereinfachend mit konstanten Kennwerten abzubilden. Unterschieden wird dabei zwischen einem mit Substrat verfüllten und einem unverfüllten Dränelement. Ein unverfülltes Dränelement wird bei der Berechnung über eine Drän- und Speicherschicht (Dicke entsprechend dem Dränelement) berücksichtigt, deren Wasseraufnahme auf die vom Hersteller angegebene maximale Wasserkapazität des Dränelements begrenzt ist. Ein mit Substrat verfülltes Dränelement wird in der Berechnung vereinfachend durch eine entsprechend dickere Substratschicht berücksichtigt.

Bei der Anpassung wurde jeweils eine möglichst gute Übereinstimmung der Berechnung mit den Messwerten angestrebt. Bei nicht zu vermeidenden Unterschieden wurden in der Berechnung tendenziell eher niedrigere Temperaturen akzeptiert, um im Sinne der Bemessung ein Ergebnis auf der sicheren Seite zu erreichen.

Vergleich der mittleren Temperaturverhältnisse

In Tabelle 11 bis Tabelle 14 sind für die vier Dachaufbauten die gemessenen und berechneten Jahresmitteltemperaturen über den Zeitraum vom 1. Februar 2012 bis 1. Februar 2013, sowie jeweils die Mitteltemperaturen für die Sommermonate (Juni, Juli, August) und für die Wintermonate (Dezember, Januar, Februar) dargestellt. Die gemessenen Werte sind sowohl für die einzelnen Positionen als auch als Mittelwert angegeben um einen besseren

Vergleich mit der Berechnung zu ermöglichen – die Differenzwerte beziehen sich jeweils auf die gemittelten Messwerte. Ist die Differenz negativ, sind die berechneten Temperaturen im Mittel niedriger und die Berechnung liegt dementsprechend auf der sicheren Seite.

Für Dachaufbau 1 (Einschichtaufbau mit 8 cm Substrat) sind die Werte in Tabelle 11 dargestellt. Die Abweichungen zwischen Berechnung und Messung an den drei Messpositionen liegen sowohl über das gesamte Jahr (grün hinterlegt) als auch über die Sommermonate (rot hinterlegt) bei etwa -0,7 K bis -1 K. In den Wintermonaten (blau hinterlegt) sind die Abweichungen mit bis zu -2 K etwas höher. Grund dafür ist die in der Simulation nicht berücksichtigte Schneedecke, unter der in der Realität meist Temperaturen um den Gefrierpunkt herrschen, die nur bei längeren Kälteperioden unterschritten werden.

Bei Dachaufbau 2 (Zweischichtaufbau mit 3 cm Substrat, Tabelle 12) sind die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung unter der Vegetationsmatte mit einer Abweichung von -0,4 K im Gesamtjahr und -0,1 K in den Sommermonaten besonders gut. Unter dem Schutz- und Speichervlies ergeben sich allerdings etwas größere Differenzen von -1,4 K (Gesamtjahr) bzw. -1,1 K (Sommer). In den Wintermonaten zeigen sich auch hier aufgrund der in der Simulation nicht berücksichtigten Schneedecke höhere Abweichungen.

Die Temperaturmittelwerte für Dachaufbau 3 und 4 (Dreischichtaufbau mit 10 cm neuem bzw. eingewachsenem Substrat) sind in Tabelle 13 und Tabelle 14 dargestellt. In den Sommermonaten sind die Abweichungen gering, wobei die berechneten Temperaturen unter dem Schutz- und Speichervlies etwas höher liegen als in der Messung. Es fällt auf, dass bei Dach 3 und 4 die Temperaturen im Sommer von oben (18,45 °C) nach unten (18,03 °C) abnehmen – obwohl die Außenoberflächentemperaturen unter den Raumlufttemperaturen (etwa 21-25 °C) liegen und sich ein genau entgegengesetztes Temperaturgefälle einstellen müsste. Dies ist bei den Messungen in Dach 1 und 2 sowie in allen Berechnungen auch der Fall. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte eine Windunterströmung der Dränelemente sein. In Dach 3 und 4 wurden die nicht verfüllten Dränelemente verwendet, die aufgrund der Lochblech-Einrahmung für den Wind gut zugänglich sind. Diese Windunterströmung ist bei einem flächigen Gründachaufbau eher unwahrscheinlich und wird daher in der Berechnung nicht berücksichtigt. In den Wintermonaten liegen die Abweichungen analog zu den beiden anderen Dachaufbauten (Berechnung ohne Schnee) wieder etwas höher, so dass sich für das Gesamtjahr eine gute und immer noch leicht auf der sicheren Seite liegende Übereinstimmung mit den Messwerten ergibt.

4.4 Validierung der Modellansätze anhand der Auswirkungen auf Leichtbaukonstruktionen

Das Augenmerk des im Zuge des Forschungsprojekts entwickelten spezifischen Gründachmodells liegt in der sicheren Planung und Beurteilung von Leichtbaukonstruktionen. Dafür ist es wichtig, dass vor allem die sich unter dem Gründach auf der Dachbahn einstellenden Temperaturen gut abgebildet werden können. Bei der Nachrechnung in Kapitel 4.3 zeigt sich allerdings, dass

trotz geringer Abweichungen bei den Tagesmittelwerten die Differenzen zwischen Messung und Berechnung bei den Maximalwerten noch bis zu 8 K betragen können. Es gilt nun zu überprüfen, ob die kurzfristig auftretenden Temperaturunterschiede zwischen Berechnung und Messung maßgebliche Auswirkungen auf die feuchtetechnische Beurteilung haben.

Am einfachsten wäre ein Vergleich der Feuchtverhältnisse der tatsächlich unter den Versuchsdächern ausgeführten Konstruktionen. Da diese jedoch weitgehend dampfdicht sind, ergeben sich infolge der kurzfristigen Temperaturabweichungen gar keine auswertbaren Unterschiede im Feuchtegehalt. Daher wird alternativ eine Leichtbaukonstruktion mit besonders sensitivem Verhalten bezüglich des Außenklimas untersucht.

Aufbau von außen nach innen:

- Dachbahn (s_d = 100 m)
- 2 cm OSB-Platte
- Mineralfaserdämmung
- PA-Folie
- 1,25 cm Gipskartonplatte

Um die verbleibenden Unterschiede zwischen Messung und Modell der Begrünung bewerten zu können, werden einmal die gemessenen und einmal die modellierten Bedingungen unter den Deckschichten als Randbedingung herangezogen. Da die gemessenen Temperaturen unter der Begrünung auch von den Eigenschaften der Konstruktion abhängen, wird zumindest der U-Wert der Leichtbaukonstruktion so angepasst, dass der dem U-Wert des tatsächlichen Versuchsdachs entspricht. Für die Unterkonstruktion von Dachaufbau 1 und 2 mit einem U-Wert von 0,27 W/(m²K) ergibt sich demnach bei der Leichtbaukonstruktion eine Dämmdicke von 13,7 cm; für den Dachaufbau 3 und 4 mit einem U-Wert von 0,37 W/(m²K) eine Dämmdicke von 9,9 cm.

Die Bedingungen unter der Begrünung werden folgendermaßen berücksichtigt:

- durch die unter dem Schutz- und Speichervlies gemessenen Temperaturen (Mittelwert aus beiden Messpositionen) in Kombination mit einer relativen Feuchte von konstant 100 % (Referenzfall)
- durch Mitberechnung der Begrünung mit dem jeweils spezifischen Gründachmodell und den im gleichen Zeitraum gemessenen Außenklimadaten in Holzkirchen.

Als Innenklima wird ein sinusförmiger Verlauf von Temperatur (zwischen 20 °C und 22 °C) und relativer Feuchte (zwischen 40 % und 60 %) angesetzt. Die Berechnungen beginnen Anfang Januar und werden über einen Zeitraum von 10 Jahren ausgewertet. Der Vergleich zwischen den beiden Varianten erfolgt durch die Auswertung des Wassergehaltsverlaufs in der OSB-Platte des Dachaufbaus, da hier infolge des mittleren Dampfdruckgefälles von innen nach

außen sowie der äußeren Abdichtung bekanntermaßen die höchsten Feuchten im Dachaufbau zu erwarten sind.

Bild 76 stellt den Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte bei Ansetzen des Gründachmodells bzw. der gemessenen Temperaturen von Dachaufbau 1 dar. Es zeigt sich, dass die beiden Kurven nach etwa drei Jahren den eingeschwungenen Zustand erreicht haben, das bedeutet, dass sich der Wassergehalt nur noch im Jahresverlauf, jedoch nicht mehr von einem Jahr zu nächsten ändert. Dabei liegt der Wassergehalt bei Ansetzen des Gründachmodells etwa 1 M.-% höher als bei Ansetzen der Messwerte - und somit etwas auf der sicheren Seite. Dieselbe Tendenz lässt sich für die Ergebnisse von Dachaufbau 2 feststellen (Bild 77) – auch hier liegen die Wassergehalte nach 10 Jahren etwa 1 M.-% auseinander, wobei das Gründachmodell wiederum auf der sicheren Seite liegt. In Bild 78 ist der Wassergehaltsverlauf für Dachaufbau 3 dargestellt. In diesem Fall sind die beiden Varianten fast deckungsgleich, wobei die Variante mit dem Gründachmodell geringfügig höhere Maximalwerte ergibt. Im Fall von Dachaufbau 4 (Bild 79) liegen die Wassergehalte mit Gründachmodell etwa 0,5 M.-% höher.

Allgemein lässt sich also feststellen, dass mit den entwickelten Gründachmodellen die Verhältnisse unter einer Dachbegrünung gut abgebildet werden können. Dabei ergeben sich in der Simulation leicht niedrigere Temperaturen unter dem Gründachaufbau und somit etwas auf der sicheren Seite liegende Feuchteverhältnisse in der Unterkonstruktion.

5 Validierung des spezifischen Gründachmodells am Standort Mailand

Bei dem neuen spezifischen Gründachmodell (Kapitel 4) wird – im Gegensatz zum generischen Modell – die langwellige Gegenstrahlung explizit bei der Berechnung mit berücksichtigt. Daher besteht nun die Möglichkeit, Dachbegrünungen auch in Klimaregionen mit anderen Strahlungsverhältnissen zu beurteilen.

Ebenfalls im Rahmen eines Forschungsprojekts werden seit März 2011 am Politecnico di Milano [49] acht verschiedene Gründachaufbauten untersucht und messtechnisch erfasst. Dem IBP liegen für den Zeitraum September 2012 bis November 2012 Messdaten von zwei Gründachaufbauten sowie alle für eine hygrothermische Simulation notwendigen, gemessenen Außenklimadaten vor. In dem vorliegenden Zeitraum fand keine Bewässerung der Gründächer statt.

Die beiden Gründächer sind von außen nach innen wie folgt aufgebaut:

Dach A: Gründach mit Dränageelement

- 14 cm Substrat
- 4 cm Dränageelement
- 6 cm XPS-Dämmung
- Dachabdichtung
- 4 cm Stahlbeton
- 4 cm stehende Luftschicht
- 28 cm Hohlblocksteine
- 1,5 cm Innenputz

Dach B: Gründach mit Blähton-Dränageschicht

- 13 cm Substrat
- 5 cm Blähton
- 6 cm XPS-Dämmung
- Dachabdichtung
- 4 cm Stahlbeton
- 4 cm stehende Luftschicht
- 28 cm Hohlblocksteine
- 1,5 cm Innenputz

Die Berechnungen erfolgen mit einer 1 cm dicken Pflanzdeckschicht, dem Optigrün-Mehrschichtsubstrat Typ E (neu), dessen Materialeigenschaften mit

dem in Mailand verwendeten Substrat vergleichbar sind, sowie einer Drän- und Speicherschicht (Dach A) bzw. einer Kiesschicht (Dach B). Die Kennwerte der übrigen Materialien wurden entsprechend den Angaben des Politecnico di Milano angesetzt oder der WUFI®-Materialdatenbank entnommen.

Die Temperaturen im Dachaufbau wurden jeweils an der Innenoberfläche, unter der XPS-Dämmung, über der XPS-Dämmung sowie 2 cm unter der Außenoberfläche gemessen.

In Bild 80 sind die gemessenen und berechneten Temperaturen 2 cm unter der Oberfläche von Dach A im Vergleich zur Außenlufttemperatur über den Zeitraum vom 15. September bis 30. November 2012 dargestellt. Die dünnen, hellen Kurven zeigen jeweils die stündlichen Werte, die dickeren, dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel. Bezgl. der Mittelwertkurven wird eine gute Übereinstimmung zwischen Messung (schwarze Kurve) und Berechnung (blaue Kurve) erreicht. Die stündlichen Werte weichen etwas stärker voneinander ab. Ein Grund dafür könnte die Inhomogenität der Substratschicht sein, deren Einfluss sich bereits bei den Nachrechnungen der Versuchsfelder am Standort Holzkirchen durch die Unterschiede der beiden im gleichen Dach und in gleicher Höhe gemessenen Temperaturen gezeigt hat. Bild 81 stellt den Vergleich der berechneten und gemessenen Temperaturen über der XPS-Dämmschicht dar. Die Unterschiede zwischen den beiden Kurven – sowohl Mittel- als auch Stundenwerte – sind hier etwas größer, was ebenfalls auf die Inhomogenität der Substratschicht zurückgeführt werden kann. Da die berechneten Temperaturen niedriger sind, liegt die Nachrechnung aus feuchtetechnischer Sicht auf der sicheren Seite. Die Temperaturverläufe unter der XPS-Dämmung sind in Bild 82 dargestellt und sind stark abhängig von der Innenoberflächentemperatur und den Eigenschaften der Unterkonstruktion. Die berechneten und gemessenen Temperaturen zeigen hier eine gute Übereinstimmung.

Die Ergebnisse der Nachrechnung des Gründachs mit einer Blähton-Dränschicht sind in Bild 83 bis Bild 85 dargestellt. Die gemessenen und berechneten Temperaturen 2 cm unter der Oberfläche zeigen eine gute Übereinstimmung und sind im Vergleich zur Außenlufttemperatur dargestellt (Bild 83). Auch die beiden Temperaturverläufe über der XPS-Dämmung in Bild 84 stimmen insgesamt gut überein – die berechneten mittleren Temperaturen liegen im Sommer fast deckungsgleich mit den gemessenen und im Winter maximal etwa 1,5 K niedriger und damit auf der sicheren Seite. Ebenfalls eine gute Übereinstimmung erreichen die gemessenen und berechneten Temperaturen unter der XPS-Dämmung, welche in Bild 85 dargestellt sind.

Dieser erste Vergleich mit Messdaten einer Begrünung an einem Standort mit etwas stärker abweichendem Außenklima bestätigt, dass mit dem spezifischen Gründachmodell auch in wärmeren Klimaregionen (mehr Strahlung, geringerer Bewölkungsgrad) die Verhältnisse unter Dachbegrünungen gut abgebildet werden können.

6 Leitfaden zur Berechnung von extensiv begrünten Dächern

Im folgenden Kapitel werden die Anwendung der beiden, in diesem Forschungsprojekt entwickelten Gründachmodelle (generisch und spezifisch) detailliert beschrieben und auch deren Anwendungsgrenzen dargelegt.

Dieser „Leitfaden" soll Planern und Bauproduktherstellern eine Grundlage für die Planung der Feuchtesicherheit von extensiv begrünten Dächern (bis maximal etwa 15 cm Substratschichtdicke) bieten. Es werden die entsprechenden Datensätze und Simulationsrandbedingungen dargestellt, um sowohl eine spezifische als auch einfache und auf der sicheren Seite liegende Planung zu ermöglichen.

6.1 Generisches Gründachmodell

Das generische Gründachmodell (siehe Kapitel 3) sollte dann Anwendung finden, wenn keine genauen Daten zum verwendeten Substrat oder keine gemessenen Gegenstrahlungsdaten vorliegen. Denn in diesem vereinfachten Modell wird die langwellige Abstrahlung implizit in der reduzierten kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl mit berücksichtigt. Diese implizite Berücksichtigung der Abstrahlung über die geringere Strahlungsabsorption ist jedoch nur dann geeignet, wenn vergleichbare Strahlungsverhältnisse wie an den untersuchten mitteleuropäischen Standorten auftreten. Andere Strahlungsverhältnisse (vor allem infolge anderer Bewölkungsgrade) können nur durch eine explizite Berechnung der langwelligen Strahlungsverluste erfasst werden.

Materialschichten

Zur Berechnung eines Gründachs mit dem generischen Modell ist das generische Substrat mit der erforderlichen Dicke (bis maximal etwa 15 cm Substratschichtdicke) anzusetzen. Die für eine hygrothermische Berechnung notwendigen Materialdaten des generischen Substrats sind in Tabelle 15 aufgelistet.

Feuchtequellen

Um den durch die Substratschicht durchfließenden Niederschlag in der Berechnung zu berücksichtigen, ist eine Feuchtequelle in die unteren 2 cm der Substratschicht anzusetzen. Diese soll bei jedem Regenereignis 40 % des Niederschlags, begrenzt auf die freie Wassersättigung, in die Substratschicht einbringen.

Randbedingungen

Bei der Anwendung des generischen Gründachmodells sind folgende Randbedingungen an der Außenoberfläche anzusetzen:

- Wärmeübergangskoeffizient: 19 W/m²K
- Kurzwellige Strahlungsabsorption: 0,3

- (Langwellige Strahlungsemission: 0)

Klima

Der für die hygrothermische Simulation von Gründächern verwendete Außenklimadatensatz muss für die Berechnung mit dem generischen Modell mindestens folgende Klimaelemente enthalten: Temperatur, relative Feuchte, Strahlung und Niederschlag.

6.2 Spezifisches Gründachmodell

Das spezifische Gründachmodell (siehe Kapitel 4) setzt sich aus einer separaten Pflanzdeckschicht und der Substratschicht zusammen. Da bei diesem Modell auch die langwellige Gegenstrahlung und damit alle Klimaelemente explizit berücksichtigt sind, sollte es prinzipiell auch für die Anwendung in anderen Klimaregionen geeignet sein. Voraussetzung hierfür ist das Vorliegen von Gegenstrahlungsdaten. Eine Validierung des Modells war allerdings bisher mit Holzkirchen und Mailand nur in Europa möglich.

Materialschichten

An der Außenoberfläche ist eine 1 cm dicke Pflanzdeckschicht zu berücksichtigen. Es wird sowohl für eine neue als auch für eine bereits eingewachsene Bepflanzung eine Schichtdicke von 1 cm empfohlen. Bei der Anpassung in Kapitel 4 zeigte sich, dass eine Differenzierung hier nicht erforderlich ist. Die notwendigen Materialkennwerte für die Pflanzschicht sind in Tabelle 16 dargestellt.

Unter der Pflanzdeckschicht ist die Substratschicht anzusetzen. Hierfür wurden im Rahmen dieses Projekts vier verschiedene Substrate der Firma Optigrün labortechnisch untersucht und die für eine hygrothermische Simulation notwendigen Materialkennwerte bestimmt. Bei den vier Substraten handelt es sich um das Optigrün-Einschichtsubstrat Typ M (Tabelle 17), das Optigrün-Leichtsubstrat Typ L (Tabelle 18) und das Optigrün-Mehrschichtsubstrat Typ E, welches zum einen im neuem Zustand (Tabelle 19) und zum anderen im eingewachsenen (etwa 10 Jahre alt) Zustand (Tabelle 20) untersucht wurde.

Bei einschichtigen Gründächern ohne separate Filter- oder Drainageschichten wird ein Substrat eingesetzt, dass diese beiden Funktionen mit übernehmen kann. Dies kann über die Eigenschaften des Einschichtsubstrats abgedeckt werden.

Das Leichtsubstrat weist eine geringe Rohdichte auf und wird mit einer Schichtdicke von nur 3 cm in Kombination mit einem Dränelement verbaut, welches mit dem Leichtsubstrat verfüllt wird. Die Anpassungen in Kapitel 4 haben ergeben, dass das mit Substrat verfüllte Dränelement am besten durch eine zusätzliche Substratschicht entsprechend der Dränelementdicke abgebildet werden kann.

Das Mehrschichtsubstrat dient lediglich als Vegetationsschicht, wonach die Filter- und Dränfunktion durch separate Materialschichten gewährleistet werden muss. Das Filtervlies ist wasserdurchlässig und verhindert in der Realität

das Verschlämmen der Drainschicht. Da Letzteres in der Simulation nicht auftritt, kann das Filtervlies in der Berechnung vernachlässigt werden. Bei den Freilandversuchen kam als Dränschicht ein Dränelement aus Kunststoff zum Einsatz. Die Materialdaten dieser zusätzlichen Drän- und Speicherschicht, welche entsprechend der Dicke des Dränelements in der Berechnung angesetzt wird, sind in Tabelle 21 dargestellt.

Feuchtequellen

In allen Substratschichten wird in den unteren 2 cm eine Feuchtequelle mit 40 % des Niederschlags begrenzt auf die freie Wassersättigung der Substratschicht angesetzt.

Zusätzlich wird bei Vorhandensein eines Dränelements eine Feuchtequelle in der gesamten Drän- und Speicherschicht mit ebenfalls 40 % des Niederschlags angeordnet. Diese Feuchtequelle wird begrenzt auf das vom Hersteller angegebene maximale Füllvolumen. Dadurch wird die Dränfunktion in der Berechnung abgebildet, da überschüssiges Wasser nicht berücksichtigt wird.

Randbedingungen

Folgende Randbedingungen sollten bei der Berechnung mit dem spezifischen Gründachmodell an der Außenoberfläche angesetzt werden:

- Wärmeübergangskoeffizient: 19 W/m²K
- Kurzwellige Strahlungsabsorption: 0,6
- Langwellige Strahlungsemission: 0,9
  (mit Berücksichtigung der langwelligen Abstrahlung)

Klima

Der für die hygrothermische Simulation von Gründächern verwendete Außenklimadatensatz muss für das spezifische Modell neben den Klimaelementen Temperatur, relative Feuchte, Strahlung und Niederschlag auch Daten zur atmosphärischen Gegenstrahlung aufweisen.

7 Energetische Vorteile eines Gründachs

Da die neu entwickelten Modelle eine genaue Berechnung der Verhältnisse unter Dachbegrünungen mit Hilfe von hygrothermischen Simulationen erlauben, besteht auch die Möglichkeit, Gründächer hinsichtlich ihres sommerlichen und winterlichen Wärmeschutzes unter Berücksichtigung der hier häufig maßgeblichen Latentwärmeeffekte (u.a. Verdunstungskühlung, Eisbildung) zu beurteilen.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden die energetischen Vorteile von Gründächern vereinfachend anhand des Wärmestroms über die Innenoberfläche bei konstantem Innenklima abgeschätzt. Der Wärmestrom durch den Regelquerschnitt des Gründachs wird im Vergleich zu dem eines Flachdachs ohne Deckschicht (mit schwarzer bzw. heller Dachbahn) dargestellt. Da hier lediglich die Dachkonstruktion betrachtet wird, können daraus noch keine Rückschlüsse auf das energetische Verhalten des gesamten Gebäudes geschlossen werden. Hierzu ist eine Betrachtung mit Hilfe einer hygrothermischen Gebäudesimulation (z.B. WUFI® Plus) notwendig, womit die Innenraumbedingungen instationär berechnet und u.a. auch die Strahlungsgewinne über Fenster mit berücksichtigt werden können.

Für die Simulation wird exemplarisch eine Konstruktion mit folgendem Aufbau betrachtet (von außen nach innen):

- Dachbahn (s_d = 300 m)
- 4 cm EPS-Dämmung
- 1,5 cm OSB-Platte
- 20 cm Mineralwolledämmung
- feuchtevariable Dampfbremse (s_d = 0,08 – 4 m)
- 1,25 cm Gipskartonplatte

Der Dachaufbau wird zum einen ohne zusätzliche Deckschicht berechnet – mit einer kurzwelligen Strahlungsabsorption von 0,9 für eine schwarze bzw. 0,6 für eine eher helle Dachbahn. Im Vergleich dazu werden der Gründachaufbau mit Leichtsubstrat (3 cm) und der Mehrschichtaufbau (10 cm Substrat) betrachtet.

Zur Abschätzung des sommerlichen Wärmeschutzes wird die Berechnung für einen warmen Sommer am Standort Freiburg durchgeführt. Im Innenraum werden eine konstante Temperatur von 20 °C und eine relative Feuchte von etwa 60 % angenommen. Für die vier verschiedenen Flachdachkonstruktionen wird jeweils der Wärmestrom über die Innenoberfläche für die Sommermonate Juni, Juli und August ausgewertet. Bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes schneidet der Gründachaufbau mit der dickeren Substratschicht (Mehrschichtaufbau) erwartungsgemäß am günstigsten ab. Beim Gründachaufbau mit Leichtsubstrat liegt die Summe der unerwünschten Wärmegewinne über die Sommermonate um 0,19 kWh/m², beim Dachaufbau mit heller Dachbahn um 1,01 kWh/m² und mit schwarzer Dachbahn um 2,26 kWh/m² höher.

Die Beurteilung hinsichtlich des winterlichen Wärmeschutzes erfolgt anhand der Wintermonate Dezember, Januar und Februar am Standort Holzkirchen. Als Innenklima werden ebenfalls konstant 20 °C bei einer relativen Feuchte von etwa 40 % angenommen. Die geringsten Wärmeverluste stellen sich beim Dachaufbau mit schwarzer Dachbahn ein. Jedoch sind die Unterschiede zwischen den vier betrachteten Flachdachaufbauten gering – beim Dachaufbau mit heller Dachbahn ergeben sich 0,32 kWh/m², mit Leichtsubstrat 0,43 kWh/m² und mit Mehrschichtsubstrat 0,34 kWh/m² zusätzliche ungewünschte Wärmeverluste im Vergleich zum Dachaufbau mit schwarzer Dachbahn. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Berechnung ohne Schnee erfolgt – die Strahlungsgewinne sind damit vor allem beim schwarzen Dach höher als bei einer vorhandenen Schneedecke. Die sich real einstellenden Unterschiede sind deshalb vermutlich noch geringer.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich Gründächer in Hinsicht auf den sommerlichen Wärmeschutz eines Gebäudes besonders günstig im Vergleich zu Flachdächern ohne Deckschicht verhalten. Verdunstungskühlung und thermische Trägheit der Begrünung führen zu niedrigeren Maximaltemperaturen und somit auch zu geringeren unerwünschten Wärmegewinnen. Die zeitliche Verzögerung der maximalen Temperaturen wirkt sich ebenfalls positiv aus, dies kann aber anhand der Bauteilberechnung nicht quantifiziert werden.

Im Hinblick auf den winterlichen Wärmeschutz zeigen Gründächer vermutlich keine oder höchstens geringe Vorteile – ohne Schnee verhält sich hier der Dachaufbau mit der schwarzen Dachbahn am günstigsten. Die Unterschiede zwischen den einzelnen betrachteten Dachkonstruktionen sind hier allerdings gering.

Das neue Gründachmodell ermöglicht eine genaue Beurteilung der thermischen Verhältnisse unter Gründächern unter Berücksichtigung des vor allem im Sommer maßgeblichen Feuchtehaushalts. Eine Quantifizierung des Energieeinsparpotentials bei unterschiedlichen Klimabedingungen sollte in umfangreicheren Berechnung mit hygrothermischen Gebäudesimulationsmodellen erfolgen. Bezüglich des sommerlichen Wärmeschutzes sind hier vor allem in warmen Regionen deutliche Vorteile zu erwarten.

8 Konstruktionsempfehlungen

Die im Rahmen dieses Projektes entwickelten Gründachmodelle (Kapitel 5) sollen eine Grundlage schaffen, um Dachbegrünungen – insbesondere auf Holzkonstruktionen – mit Hilfe hygrothermischer Simulationen zuverlässig berechnen und planen zu können.

Begrünte Holzkonstruktionen haben in den letzten Jahren immer wieder zu Bauschäden und in der Folge auch zu Unsicherheiten bei den Planern geführt. Mit den neu entwickelten Gründachmodellen können nun die Feuchteverhältnisse in Leichtbaukonstruktionen auch rechnerisch abgebildet und beurteilt werden. Dies ermöglicht sowohl eine bessere bauphysikalische Planung als auch eine bessere Beurteilung der bisher ausgeführten Gründächer.

Exemplarisch werden daher am Beispiel eines üblichen Leichtbaudachs die sich einstellenden hygrothermischen Verhältnisse in Abhängigkeit der Dämmdicke ermittelt und bei Bedarf Verbesserungsvorschläge erarbeitet. Auf Grundlage dieser Untersuchungsergebnisse werden allgemeine Empfehlungen für die Praxis sowie Hinweise zur Ausführung von begrünten Leichtbaudächern erarbeitet.

8.1 Durchgeführte Untersuchungen

Für die Simulation wird folgendes Leichtbaudach betrachtet (von außen nach innen):

- Dachbahn
- ggf. Überdämmung (EPS)
- 1,5 cm OSB-Platte (Dichte 615 kg/m³)
- 20 cm / 40 cm Dämmung
- feuchtevariable Dampfbremse
- 1,25 cm Gipskartonplatte

Zusätzlich wird das Leichtbaudach mit 40 cm Dämmung und einer innenseitigen OSB-Platte ohne Dampfbremse untersucht – eine im Hallenbau häufig verwendete Bauweise.

Die Berechnungen erfolgen mit der Mineralfaserdämmung „ISOVER GW Integra ZKF-035“ (Wärmeleitfähigkeit 0,035 W/m²K) und der Zellulosefaserdämmung „Isofloc L“ (Wärmeleitfähigkeit 0,037 W/m²K). Zudem werden die zwei feuchtevariablen Dampfbremsen „INTELLO“ (pro clima) und „Vario Xtra“ (Saint-Gobain ISOVER) untersucht. Die Kennwerte der verschiedenen Materialien stammen aus der WUFI®-Materialdatenbank sowie aus am IBP durchgeführten Labormessungen. Aus den im Labor für unterschiedliche Feuchtebereiche gemessenen s_d-Werten der „Vario Xtra“ wurden die tatsächlichen von der Feuchteverteilung innerhalb der Folie abhängigen materialspezifischen µ-Werte bestimmt. Die OSB-Schalung wird hier mit einer Dicke von 1,5 cm angenommen - die sich ergebenden

Feuchtegehalte liegen dabei im Vergleich zu dickeren Platten auf der sicheren Seite.

Stellen sich ohne EPS-Überdämmung in der OSB-Platte zu hohe Feuchtegehalte ein, wird die Überdämmung schrittweise erhöht (Dämmdicken: 5 cm, 10 cm, 12 cm, 15 cm, 18 cm), bis sich hygrothermisch unproblematische Verhältnisse in der Konstruktion ergeben.

Dieses Leichtbaudach wird in Kombination mit sieben verschiedenen Begrünungen untersucht, die alle mit Hilfe der im Rahmen dieses Projekts entwickelten Modelle abgebildet werden können.

- Einschichtaufbau mit 8 cm Einschichtsubstrat Typ M
- Zweischichtaufbau mit 3 cm Leichtsubstrat Typ L und Dränelement (2,5 cm; verfüllt)
- Dreischichtaufbau mit 10 cm Mehrschichtsubstrat Typ E (neu) und Dränelement (4 cm; unverfüllt)
- Dreischichtaufbau mit 10 cm Mehrschichtsubstrat Typ E (alt) und Dränelement (4 cm; unverfüllt)
- Generisches Modell mit 8 cm Substrat
- Generisches Modell mit 10 cm Substrat
- Generisches Modell mit 10 cm Substrat und Dränelement (4 cm; unverfüllt)

Die Materialdaten und anzusetzenden Feuchtequellen für die verschiedenen Gründachmodelle werden entsprechend Kapitel 5 verwendet.

Die neue Holzschutznorm DIN 68800 [48] fordert für die Bemessung von Leichtbaukonstruktionen nicht nur die Berücksichtigung des Feuchteeintrags über Diffusion sondern auch über Luftströmung. Dazu gibt es vereinfachte stationäre, aber auch instationäre Ansätze. Die in Abhängigkeit von der Luftdichtheit konvektiv in die Konstruktion eindringende Feuchtemenge wird in der Simulation über das Infiltrationsmodell des IBP berücksichtigt. Hierbei wird eine Feuchtequelle im unteren Bereich der OSB-Platte eingebracht (im Falle einer Konvektionsströmung von innen nach außen fällt das Tauwasser an dieser Stelle aus). Die Menge der im Winter eingebrachten Feuchte wird aus dem Überdruck aufgrund des thermischen Auftriebs (bei 5 m Innenraumhöhe), der Innenraumluftfeuchte und der Luftdichtheit der Hülle (q_{50} = 3 m³/m²h) bestimmt [47]. Bei den folgenden Untersuchungen wird an einem Beispiel der Einfluss der unterschiedlichen Luftdichtheitsniveaus dargestellt

Als Außenklima werden hier nicht mehr die über den Versuchszeitraum gemessenen Außenklimabedingungen angesetzt, sondern das für hygrothermische Simulationen als kritisch geltende Feuchtereferenzjahr von Holzkirchen. Dabei handelt es sich um stündlich gemessene Klimadaten der Jahre 2005 und 2006. Im Innenraum werden Wohnraumbedingungen mit normaler Feuchtelast nach DIN EN 15026 [37] verwendet, welche sich in Abhängigkeit von den aktuellen Außenklimabedingungen einstellen. Der

Wärmeübergangskoeffizient beträgt innen 8 W/m²K und außen 19 W/m²K. Für die spezifischen Gründachmodelle wird eine kurzwellige Strahlungsabsorptionszahl von 0,6 und eine langwellige Strahlungsemissionszahl von 0,9 angesetzt, für das generische Gründachmodell eine Absorption von 0,3 ohne langwellige Strahlungsemission (analog zu Kapitel 5). Als Anfangsfeuchte wird für die Zellulosefaserdämmung der sich nach 30 Jahren einstellende Wassergehalt (6,1 kg/m³) angesetzt. In den restlichen Materialien wird eine Anfangsfeuchte entsprechend der Sorptionsfeuchte bei 80 % relativer Feuchte verwendet. Die Berechnungen beginnen im Oktober und werden über einen Zeitraum von 15 Jahren durchgeführt.

8.2 Ergebnisse

Zur Bewertung der Ergebnisse wird jeweils der Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte betrachtet, da hier erfahrungsgemäß die höchsten Feuchten im Querschnitt auftreten. Feuchtetechnisch kritische Verhältnisse bezüglich einer Schädigung der Holzwerkstoffplatte können bei langfristigem Überschreiten des in der DIN 68800 [48] angegebenen Grenzwertes der Holzfeuchte von 18 M.-% auftreten. In den folgenden Diagrammen ist dieser Bereich ab 18 M.-% gelb hinterlegt. Dieser Wert enthält allerdings Sicherheitsbeiwerte für die Bemessung - ab einer Holzfeuchte von etwa 25 M.-% ist dagegen das tatsächliche Holzfäulerisiko auch nach wissenschaftlichen Modellen unstrittig hoch, daher ist dieser Bereich in den Bildern rot markiert.

Leichtbaudach mit „ISOVER GW Integra ZKF-035“ und „INTELLO“

In Bild 86 sind die Wassergehalte in der OSB-Platte für das Leichtbaudach mit 20 cm Mineralwolledämmung und der feuchtevariablen Dampfbremse „INTELLO“ für die sieben verschiedenen Gründachaufbauten dargestellt. Es zeigt sich, dass der Wassergehalt bei allen Varianten – mit Ausnahme des Zweischichtaufbaus – über die ersten Jahre kontinuierlich steigt und erst nach etwa 10 Jahren den eingeschwungenen Zustand erreicht. Die Maximalwerte nach 15 Jahren liegen zwischen 19 und 21,5 M.-% und somit über dem Grenzwert von 18 M.-%. Lediglich der Zweischichtaufbau mit einer geringen Aufbauhöhe erreicht den eingeschwungenen Zustand bereits nach einem Jahr mit maximal gut 17 M.-%.

An diesem Leichtbaudach wurde exemplarisch für den Gründachaufbau „Dreischichtaufbau (10cm Substrat neu)“ der Einfluss unterschiedlicher Luftdichtheitsniveaus untersucht. Bild 87 stellt den Wassergehalt in der OSB-Schalung in Abhängigkeit von der Luftdichtheit dar. Nach 15 Jahren ergibt sich mit einer Luftdichtheit von q_{50} = 5 m³/m²h ein Wassergehalt von maximal 24 M.-%, mit q_{50} = 3 m³/m²h von 21,5 M.-% und mit q_{50} = 1 m³/m²h von 19,5 M.-%. Wird in der Berechnung keine Infiltrationsquelle berücksichtigt, ergibt sich ein Wassergehalt von maximal 18,5 M.-%. Da die unterschiedlichen Luftdichtheitsniveaus eine deutliche Auswirkung auf den Wassergehalt in der OSB-Platte haben, ist in der Praxis darauf zu achten, dass die für die Planung angenommene Luftdichtheit am Objekt später auch nachgewiesen wird. Nur so kann sichergestellt werden, dass berechneten Feuchten auch dauerhaft eingehalten werden.

Zum Vergleich zu den feuchtevariablen Dampfbremsen wurden für drei Gründachaufbauten (Einschicht-, Zweischicht- und Dreischichtaufbau) auch Dampfbremsen mit s_d-Werten von 2 m bzw. 5 m betrachtet. Bild 88 und Bild 89 zeigen, dass in allen Fällen der Wassergehalt in der OSB-Platte stark ansteigt und nach 15 Jahren über 25 M.-% liegt. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass bei Gründächern feuchtevariable Dampfbremsen günstigere Feuchtebilanzen aufweisen als konventionelle, da sie den Feuchteeintrag im Winter reduzieren, die Trocknung im Sommer dagegen beschleunigen.

Wird die OSB-Schalung der ursprünglich betrachteten Konstruktion mit 20 cm Mineralwolledämmung und „INTELLO" auf der Innenseite mit einer 5 cm dicken EPS-Platte überdämmt, ist der Unterschied bezüglich des Wassergehalts in der OSB-Platte bei den sieben Gründachvarianten nur noch gering. Die Wassergehalte liegen nach 15 Jahren zwischen 15,5 M.-% und 17 M.-% und somit unter dem Grenzwert (Bild 90).

Ist das Leichtbaudach mit 40 cm Mineralwolle gedämmt, ergeben sich ohne zusätzliche Überdämmung die Wassergehalte entsprechend Bild 91. Da aufgrund der größeren Dämmstärke die Temperaturen in der OSB-Platte geringer sind, weisen alle Gründachaufbauten einen entsprechend höheren Wassergehalt auf. Der Zweischichtaufbau schneidet hier wiederum am besten ab, liegt aber mit maximal 19 M.-% nach 15 Jahren ebenfalls über dem Grenzwert. Die anderen Varianten erreichen Maximalwerte von 21 M.-% bis 25 M.-%. Mit einer Überdämmung von 5 cm liegen alle Varianten wieder sehr nah zusammen – den Grenzwert von 18 M.-% kann allerdings nur der Zweischichtaufbau einhalten (Bild 92). Alle anderen Gründachaufbauten bleiben dauerhaft erst mit einer Überdämmung von 10 bzw. 12 cm unterhalb von 18 M.-% (Bild 93 und Bild 94).

Für das Leichtbaudach mit „ISOVER GW Integra ZKF-035" und „INTELLO" sind in Tabelle 22 noch einmal die nach 15 Jahren maximal erreichten Wassergehalt der OSB-Platten in Abhängigkeit vom Gründachaufbau und der Überdämmungsdicke übersichtlich dargestellt. Dabei sind Wassergehalte über 18 M.-% rot und unter 18 M.-% grün hinterlegt.

Leichtbaudach mit „ISOVER GW Integra ZKF-035" und „Vario Xtra"

Wird das Leichtbaudach mit der Mineralfaserdämmung „ISOVER GW Integra ZKF-035" und der feuchtevariablen Dampfbremse „Vario Xtra" betrachtet, ergeben sich bei einer Dämmstärke von 20 cm ohne zusätzliche Überdämmung die in Bild 95 dargestellten Wassergehalte in der OSB-Platte. Während auch hier der Zweischichtaufbau bereits nach einem Jahr den eingeschwungenen Zustand mit Maximalwerten von 17 M.-% erreicht, steigt der Wassergehalt in allen anderen Varianten kontinuierlich an und liegt nach 15 Jahren bei maximal 19,5 M.-% bis 22 M.-%. Mit einer zusätzlichen Überdämmung von 5 cm ergeben sich die in Bild 96 dargestellten Wassergehaltsverläufe. Alle Varianten bleiben zwar nach 15 Jahren mit maximal 17 M.-% unter dem Grenzwert nach DIN 68800, bis auf den Zweischichtaufbau zeigen allerdings alle noch einen geringen, sich verlangsamenden Anstieg. Ggf. wäre hier eine längere Berechnung unter Berücksichtigung der Standzeit des Gebäudes erforderlich.

Bei Leichtbaudächern mit 40 cm Zwischensparrendämmung ohne zusätzliche Überdämmung liegen alle Varianten über dem Grenzwert von 18 M.-% (Bild 97). Die Ergebnisse mit 5 cm Überdämmung sind in Bild 98 dargestellt – auch hier liegen alle Gründachaufbauten nach 15 Jahren noch über dem Grenzwert. Dieser wird erst mit einer Überdämmung von 10 cm (Bild 99) von allen Varianten eingehalten – allerdings steigen die Wassergehalt noch langsam an, so dass die Wassergehalte dauerhaft erst mit einer Überdämmung von 12 cm unterhalb des Grenzwerts bleiben (Bild 100).

Eine Zusammenfassung der maximalen Wassergehalte nach 15 Jahren ist in Tabelle 23 in Abhängigkeit vom Gründachaufbau und der Dämmstärke dargestellt.

Leichtbaudach mit „ISOVER GW Integra ZKF-035“ und innenseitiger OSB-Platte

Die Berechnungen der Konstruktion mit Mineralwolledämmung und einer innenseitigen OSB-Platte ohne Dampfbremse werden nur mit einer Dämmdicke von 40 cm durchgeführt, da dies eine im Hallenbau sehr verbreitete Konstruktion darstellt. Bild 101 zeigt, dass ohne Überdämmung der äußeren OSB-Platte die Wassergehalte aller Gründachaufbauten über den Berechnungszeitraum steigen und nach 15 Jahren Maximalwerte von 34 M.-% bis 50 M.-% erreichen. In Bild 102 bis Bild 106 sind die Ergebnisse mit 5 bis 18 cm Überdämmung dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten mit zunehmender Überdämmung immer geringer werden. Aufgrund des hohen Diffusionswiderstandes der innenseitig angebrachten OSB-Platte bleiben die Wassergehalte erst mit einer zusätzlichen Überdämmung von 15 bzw. 18 cm unter 18 M.-%.

Eine Übersicht der maximalen Wassergehalte nach 15 Jahren stellt Tabelle 24 dar.

Leichtbaudach mit „Isofloc L“ und „INTELLO“

Die Ergebnisse für das Leichtbaudach mit 20 cm Zellulosefaserdämmung und der feuchtevariablen Dampfbremse „INTELLO“ sind in Bild 107 bis Bild 109 dargestellt. Der Wassergehalt in der OSB-Platte steigt bei allen Varianten an und erreicht Maximalwerte von 22 M.-% bis 24 M.-%. Auch mit einer 5 cm dicken Überdämmung liegen alle Gründachvarianten nach 15 Jahren noch leicht über dem Grenzwert von 18 M.-%. Dieser wird erst mit einer Überdämmung von 10 cm eingehalten.

Bei einer Konstruktion mit 40 cm Zellulosefaserdämmung ist eine zusätzliche Überdämmung der Schalung von mindestens 15 cm notwendig, um bei allen Gründachvarianten einen Wassergehalt in der OSB-Platte von dauerhaft unter 18 M.-% zu gewährleisten (Bild 110 bis Bild 114).

In Tabelle 25 sind die Ergebnisse für das Leichtbaudach mit „Isofloc L“ und „INTELLO“ noch einmal übersichtlich aufgelistet.

Leichtbaudach mit „Isofloc L“ und „Vario Xtra“

Bei dem Leichtbaudach mit 20 cm „Isofloc L“ und der feuchtevariablen Dampfbremse „Vario Xtra“ ergeben sich ohne zusätzliche Überdämmung die in Bild 115 dargestellten Wassergehaltsverläufe. Für alle Varianten liegt der Wassergehalt nach 15 Jahren ganzjährig über dem Grenzwert von 18 M.-%. Mit einer 5 cm dicken Überdämmung sinkt der Wassergehalt zwar deutlich, der Grenzwert wird jedoch immer noch temporär überschritten (Bild 116). Erst mit einer Überdämmung von 10 cm liegen alle Wassergehalte mit maximal 16,5 M.-% unterhalb des Grenzwertes (Bild 117).

Bild 118 bis Bild 122 zeigen, dass mit einer 40 cm dicken Zellulosefaserdämmung zwischen den Sparren die Wassergehalte aufgrund der niedrigeren Temperaturen in der OSB-Schalung höher liegen. Mit mindestens 15 cm Überdämmung erreichen alle Varianten Maximalwerte unter 18 M.-%.

Eine Übersicht der sich nach 15 Jahren einstellenden Maximalwerte des Wassergehalts ist in Tabelle 26 dargestellt.

Leichtbaudach mit „Isofloc L“ und innenseitiger OSB-Platte

Bei dem Leichtbaudach mit 40 cm Zellulosefaserdämmung und einer OSB-Platte an der Innenseite liegen die Wassergehalte in der äußeren OSB-Schalung ohne zusätzliche Überdämmung mit maximal 25 M.-% bis 28 M.-% deutlich niedriger als bei der Variante mit Mineralwolledämmung (Bild 123). Allerdings ist auch mit Zellulosefaserdämmung eine 18 cm dicke Überdämmung notwendig, um die maximalen Wassergehalte in allen Fällen unter 18 M.-% zu halten (Bild 124 bis Bild 128).

Eine Übersicht der maximalen Wassergehalte in der OSB-Platte des Leichtbaudachs mit „Isofloc L“ und einer innenseitigen OSB-Platte sind in Tabelle 27 zusammengestellt.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass begrünte Holzkonstruktionen ein nur geringes Trocknungspotenzial aufweisen und der Feuchtegehalt sich allgemein nur sehr langsam einschwingt. Da sich die Dachoberfläche unter der Begrünung nur selten und wenig über die Außenlufttemperatur erwärmt, ist eine Trocknung zum Innenraum nur in geringem Umfang und über wenige Wochen im Sommer möglich. Ein durchlässiger Dämmstoff und ein niedriger s_d-Wert der Dampfbremse begünstigen diesen Vorgang.

Mit einer feuchtevariablen Dampfbremse verhält sich daher die Mineralwolle-dämmung langfristig günstiger als die Zellulosefaserdämmung, da letztere aufgrund der Feuchtespeicherkapazität träger reagiert.

In mit Leichtsubstrat begrünten Konstruktionen ergeben sich vor allem mit Mineralwolledämmung geringere Feuchtegehalte in der äußeren Schalung als bei allen anderen untersuchten Gründachaufbauten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die geringe Aufbaudicke von nur 3 cm die Erwärmung unter der Begrünung und damit das Trocknungspotential nach innen etwas größer ist. Aufgrund des geringen Diffusionswiderstandes wird die

Feuchte in der Mineralwolledämmung im Sommer schneller zur Innenseite transportiert, so dass hier eine bessere Trocknung zu erwarten ist. Mit zunehmender Überdämmungsdicke steigen die Temperatur in der OSB-Schalung im Winter an. In Folge dessen nähern sich die Wassergehalte der unterschiedlichen Gründachvarianten an, so dass ab etwa 10 cm Überdämmung kaum noch Unterschiede zwischen den Varianten festgestellt werden können.

Einen deutlichen Einfluss auf den Wassergehalt in der OSB-Schalung hat auch der raumseitige Diffusionswiderstand. Während die Unterschiede zwischen den beiden untersuchten feuchtevariablen Dampfbremsen vernachlässigbar gering bleiben, ergeben sich mit konstanten s_d-Werten deutlich ungünstigere hygrothermische Verhältnisse. Gleiches gilt auch für die Anordnung einer raumseitigen OSB-Platte – hier sind bei allen untersuchten Gründachvarianten hohe Überdämmungsdicken (15 bis 18 cm) notwendig.

Eine Übersicht der erforderlichen Überdämmungsdicken in Abhängigkeit von der Zwischensparrendämmung und dem raumseitigen Diffusionswiderstand ist in Tabelle 28 dargestellt.

8.3 Empfehlungen für die Praxis

Die rechnerischen Untersuchungen an einer typischen Leichtbaukonstruktion verdeutlichen, dass sechs der sieben untersuchten Gründachaufbauten zu sehr ähnlichen hygrothermischen Verhältnissen in der OSB-Platte führen. Lediglich das Leichtsubstrat ermöglicht mit seiner geringen Aufbaudicke von 3 cm eine stärkere Erwärmung der Konstruktion und führt somit zu günstigeren Verhältnissen in der Unterkonstruktion. Doch auch mit diesem Aufbau bleiben bei bisheriger Bauweise nur die beiden Leichtbaudächer mit 20 cm Mineralwolledämmung und raumseitiger feuchtevariabler Dampfbremse unter dem in der DIN 68800 angegebenen Grenzwert von 18 M.-%. Bei allen anderen begrünten Leichtbaudächern ist eine zusätzliche Überdämmung der Schalung notwendig, um den Grenzwert einzuhalten. Allerdings werden ohne Überdämmung in den meisten Fällen noch keine Verhältnisse erreicht, bei denen eine Schädigung der Beplankung durch Holzfäule zu erwarten ist.

Daher erscheint es sinnvoll, bei den Konstruktionsempfehlungen zwischen der Planung von Neubauten und der Bewertung von Bestandskonstruktionen zu unterscheiden.

Bei der Neuplanung von begrünten Dächern sollte der Grenzwert von 18 M.-% in der äußeren Schalung nicht überschritten werden, so dass hier in der Regel eine zusätzliche Überdämmung der äußeren Schalung vorgesehen werden sollte. Als einfache Lösung wäre es denkbar, diese standardmäßig als Umkehrdachdämmung in den Gründachaufbau zu integrieren und durch die Begrünungsfirma aufbringen zu lassen.

Da die Grenzwerte aus der DIN 68800 gewisse Sicherheiten enthalten, ist es für Konstruktionen im Bestand nicht in allen Fällen erforderlich, diese in der Berechnung einzuhalten. Weist eine Konstruktion bislang keine Schäden auf, können temporäre und leichte Überschreitungen der Grenzwerte bei der Nachberechnung durchaus akzeptiert werden, wenn z.B. durch Prüfung eine

gute Luftdichtheit des Gebäudes nachgewiesen wurde. Im Zweifel sollten vor dem Ergreifen weiterer Maßnahmen die real auftretenden Holzfeuchten im Winter messtechnisch erfasst werden, um einen evtl. Handlungsbedarf abzusichern. Die bei der Berechnung berücksichtigten Sicherheiten bei Einbaufeuchte oder Klima- und Nutzungsbedingungen können im Einzelfall natürlich auch günstiger liegen.

8.4 Weitere Hinweise zur Ausführung von begrünten Leichtbaukonstruktionen

Aufgrund des bei Begrünungen geringen Trocknungspotentials, sollten folgende Hinweise zur Ausführung von Leichtbaudächern beachtet werden:

- Dachränder (Traufe und First) sind luftdicht auszuführen, da ansonsten aufsteigende, warme und feuchte Luft konvektiv über den Rand in die Konstruktion eindringen und in dem, häufig zwischen Dämmung und Schalung verbleibenden, kleinen Luftspalt zu Feuchteschäden führen kann.
- Der Anschluss von einbindenden Bauteilen ist luftdicht auszuführen, insbesondere bei Massivwänden mit Einbaufeuchte.
- Verwendung von möglichst dampfdichten Dachbahnen (s_d-Wert mind. 300 m), da bei Gründächern eine Trocknung zur Außenseite ohnehin nicht möglich ist. Moderat sperrende Dachbahnen (s_d-Werte von 20 – 50 m) können im ungünstigsten Fall zu einer zusätzlichen Befeuchtung der Konstruktion von außen führen.
- Der für die Planung angesetzte q50-Wert ist nach Ausführung des Gebäudes zu prüfen.

9 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurden zwei Gründachmodelle (generisch und spezifisch) entwickelt, um Dachbegrünungen – insbesondere auf Holzkonstruktionen – mit Hilfe hygrothermischer Simulationen zuverlässig berechnen und planen zu können. Ziel ist es, Planern und Bauproduktherstellern eine möglichst genaue und zuverlässige Grundlage für die Planung der Feuchtesicherheit von extensiv begrünten Dächern (bis maximal etwa 15 cm Substratschichtdicke) zur Verfügung stellen zu können.

Das generische Gründachmodell (siehe Kapitel 3) wurde auf Basis von Freilandversuchen in Holzkirchen, Leipzig, Wien und Kassel entwickelt. In diesem vereinfachten Modell wird die langwellige Abstrahlung implizit in der reduzierten kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl mit berücksichtigt – dies ist jedoch nur dann geeignet, wenn vergleichbare Strahlungsverhältnisse wie an den untersuchten mitteleuropäischen Standorten auftreten. Andere Strahlungsverhältnisse (vor allem infolge anderer Bewölkungsgrade) können nur durch eine explizite Berechnung der langwelligen Strahlungsverluste erfasst werden. Aus diesem Grund ist das generische Gründachmodell in der Regel nur für Standorte in Mitteleuropa geeignet und sollte dann Anwendung finden, wenn keine gemessenen Gegenstrahlungsdaten oder keine genauen Kenntnisse zum verwendeten Substrat vorliegen.

Das spezifische Gründachmodell (siehe Kapitel 4), welches anhand von neuen Labor- und Freilandversuchen am Standort Holzkirchen entwickelt wurde, setzt sich aus einer separaten Pflanzdeckschicht und einer Substratschicht zusammen. Da bei diesem Modell auch die langwellige Gegenstrahlung und damit alle Klimaelemente explizit berücksichtigt sind, sollte es prinzipiell auch für die Anwendung in anderen Klimaregionen geeignet sein. Voraussetzung hierfür ist das Vorliegen von Gegenstrahlungsdaten. Eine Validierung fand bisher an den Standorten Holzkirchen und Mailand statt.

Die genaue Vorgehensweise bei der Simulation von Dachbegrünungen ist in Kapitel 6 schrittweise beschrieben.

Eine Beurteilung der energetischen Auswirkungen von Dachbegrünungen war selbst nicht Bestandteil des Projekts, wurde jedoch bezogen auf den Wärmestrom durch den Regelquerschnitt des Dachs in Kapitel 7 kurz angerissen. Dabei zeigen sich im Vergleich zu Flachdächern ohne Deckschichten durchaus Vorteile für den Wärmeschutz im Sommer – die Unterschiede im Winter bleiben allerdings eher gering. Eine genauere Bewertung ist jedoch nur anhand einer Simulation von gesamten Gebäuden möglich, bei der auch der Einfluss der Begrünung auf das Raumklima mit erfasst wird. Das neu entwickelte Modell liefert dafür die erforderlich Voraussetzungen.

Exemplarisch wurden am Beispiel eines üblichen Leichtbaudachs die sich einstellenden hygrothermischen Verhältnisse in Abhängigkeit von Gründachaufbau, Dämmmaterial, Dämmstärke und raumseitigem Diffusionswiderstand ermittelt. Auf Basis dieser Untersuchungsergebnisse wurden anschließend allgemeine Empfehlungen zur Ausführung von begrünten

Leichtbaudächern für die Praxis erarbeitet. Hier erscheint es erforderlich, zwischen Planung von Neubauten und Bestandskonstruktionen zu unterscheiden. Bei der Planung sollte der in der DIN 68800 angegebene Grenzwert von 18 M.-% nicht überschritten werden, so dass hier bei fast allen Konstruktionen eine zusätzliche Überdämmung der äußeren Schalung notwendig ist. Da die Ansätze gewisse Sicherheiten enthalten, ist es für Konstruktionen im Bestand nicht in allen Fällen erforderlich, in der Berechnung die Grenzwerte aus der DIN 68800 einzuhalten. Falls die Konstruktionen bislang schadensfrei sind, können temporäre und leichte Überschreitungen der Grenzwerte durchaus akzeptiert werden – im Zweifel sollte eine Messung der tatsächlichen Holzfeuchte im Winter durchgeführt werden.

10 Literatur

[1] Minke, G.; Otto, F.; Gross, R.: Ermittlung des Wärmedämmverhaltens von Gründächern. Abschlussbericht, AZ 24242-25. ZUB Kassel. Juli 2009.

[2] Winter, S.; Fülle, C.; Werther, N.: Forschungsprojekt MFPA Leipzig und TU München (Z 6 – 10.08.18.7-07.18). "Flachdächer in Holzbauweise". 2007-2010.

[3] Schmidt, D.; Winter, S.: Informationsdienst HOLZ spezial – Flachdächer in Holzbauweise, Oktober 2008.

[4] Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks e. V. (Hrsg.): Regeln für Abdichtungen – mit Flachdachrichtlinie. Köln 2008.

[5] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL) (Hrsg.): Richtlinien für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen – Dachbegrünungsrichtlinie. Bonn 2008.

[6] Verband für Bauwerksbegrünung: Grundlagen der Dachbegrünung. 2007. (www.gruendach.at)

[7] Künzel, H.M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation Universität Stuttgart 1994.

[8] DDH Edition: Gründach. Rudolf Müller Verlag. Band 14.

[9] Schweizerische Fachvereinigung Gebäudebegrünung: Gebäudebegrünung. Dach – Fassade – Innenraum.

[10] Verband für Bauwerksbegrünung: Grundlagen der Dachbegrünung. 2007.

[11] Häupl, P.; Petzold, H.: Hygrothermische Untersuchungen an begrünten Flachdächern. Tagungsband zum 12. Bauklimatischen Symposium an der TU Dresden. S. 893 – 900. Dresden 2007.

[12] Liesecke, H.-J.: Substrate für extensive Dachbegrünungen (Teil 1) – Vergleichende Beurteilung der Eigenschaften aus Eignungsuntersuchungen 1990/1995/2002. Neue Landschaft 6/03. S. 40-44. 2003.

[13] Liesecke, H.-J.: Substrate für extensive Dachbegrünungen (Teil 2) – Vergleichende Beurteilung der Eigenschaften aus Eignungsuntersuchungen 1990/1995/2002. Neue Landschaft 8/03. S. 44-47. 2003.

[14] Liesecke, H.-J.: Kennwerte von Vegetationssubstraten für extensive Dachbegrünungen. Dach+Grün 3/2004. S. 30-37. 2004.

[15] Liesecke, H.-J.: Kennwerte von Vegetationssubstraten für extensive Dachbegrünungen – Ableitung von Kennwerten, Eigenschaften von Substrattypen und Stoffgruppen, Lastannahmen und Wasserspeicherung. Neue Landschaft 1/06. S. 44-51. 2006.

[16] Liesecke, H.-J.: Kennwerte für mineralische Schüttstoffe. Neue Landschaft 11/04. S. 33-39. 2004.

[17] Liesecke, H.-J.: Frostbeständigkeit von Mineralstoffen für die Dachbegrünung – Ergebnisse von Laborprüfungen und Erkenntnisse aus Freilanduntersuchungen. Neue Landschaft 2/05. S. 38-41. 2005.

[18] Liesecke, H.-J.: Vegetationstechnische Anforderungen in der Dachbegrünungsrichtlinie – Zur Diskussion gestellte Vorschläge für die Weiterentwicklung. Dach+Grün. 4/2005. S. 4-10. 2005.

[19] Liesecke, H.-J.: Kennwerte für Matten- und Platten-Elementen – Schichtdicken, Lastannahmen, Wasserspeicherung. Neue Landschaft. 6/06. S. 56-59. 2006.

[20] Liesecke, H.-J.: Langzeitentwicklung von Substraten für die extensive Dachbegrünung – Veränderungen im Gehalt an organischer Substanz, im pH-Wert, in der Wasserspeicherung und in der Lastannahme. Dach+Grün. 3/2006. S. 4-7. 2006.

[21] Liesecke, H.-J.: Zur Verwendung von Hydrogelen in der Dachbegrünung – Erfahrungen und Ergebnisse aus Versuchen und mit einer Neuentwicklung. Neue Landschaft. 11/05. S. 41-45. 2005.

[22] Liesecke, H.-J.: Jährliche Wasserrückhaltung durch extensive Dachbegrünungen. Dach+Grün. 2/2005. S. 4-13. 2005.

[23] Palomo del Barrio, E.: Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. Energy and Buildings 27. S. 179-193. 1998.

[24] Roth-Kleyer, S.: Fünf Jahre Ergebnisse aus Geisenheim – Substratforschung von 2003 bis 2007. Dach+Grün 3/2008. S. 10-17. 2008.

[25] Roth-Kleyer, S.: Ein Gründach hilft der Siedlungswasserwirtschaft. Dach+Grün Spezial 2009. S. 22-29. 2009.

[26] Theodosiou, T. G.: Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. Energy and Buildings 35. S. 909-917. 2003.

[27] Lazzarin R. G.; Castellotti, F.; Busato, F.: Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. Energy and Buildings 37. S. 1260-1267. 2005.

[28] Sailor, D.J.; Hutchinson, D.; Bokovoy, L.: Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S. Energy and Buildings 40. S.

1246-1251. 2008.

[29] Alexandri, E.; Jones, P.: Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results. Energy and Buildings 42. S. 2835-2849. 2007.

[30] Sailor, D.J.: A green roof model for building energy simulation programs. Energy and Buildings 40. S. 1466-1478. 2008.

[31] Kumar, R.; Kaushik, S.C.: Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. Energy and Buildings 40. S. 1505-1511. 2005.

[32] Wolf, D.; Lundholm, J.T.: Water uptake in green roof microcosmos: Effects of plant species and water availability. Ecological Engineering 33. S. 179-186. 2008.

[33] Sailor, D.J.; Elley, T.B.; Gibson, M.: Exploring the Building Energy Impacts of Green Roof Design Decisions – A Modeling Study of Buildings in 4 Distinct Climates. Building Enclosure Science & Technology (BEST 3) Conference. 2012.

[34] Künzel, H.M.: Feuchteverhalten begrünter Umkehrdächer. Sonderdruck aus BBauBL 45. H. 5, S. 382-384. 1996.

[35] Künzel, H.M.; Kießl, K.: Moisture Behaviour of Protected Membrane Roofs with Greenery. CIB W40 Proceedings Kyoto. 1997.

[36] WTA-Merkblatt 6-2-01/D: Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Mai 2002.

[37] DIN EN 15026: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen – Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation. Juli 2007.

[38] ASHRAE Standard 160: Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. 2009.

[39] DIN 4108-3: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Juli 2001.

[40] Teibinger, M.; Nusser, B.: Ergebnisse experimenteller Untersuchungen an flachgeneigten hölzernen Dachkonstruktionen. Herausgegeben von Holzforschung Austria, Wien. (Forschungsbericht, HFA-Nr.: P412), 2010.

[41] DIN EN ISO 12572: Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen. September 2001.

[42] DIN EN ISO 15148: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten bei teilweisem Eintauchen. März 2003.

[43] Krus, M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Diss. Universität Stuttgart (1995).

[44] Krus, M.; Holm, A.: Ermittlung der Kapillartransportkoeffizienten mineralischer Baustoffe aus dem w-Wert; Bauinstandsetzen 3 (1997), H.1, S. 219-234.

[45] Holm, A.; Krus, M.: Bestimmung des Transportkoeffizienten für die Weiterverteilung aus einfachen Trocknungsversuchen und rechnerischer Anpassung; Bauinstandsetzen 4 (1998), H.1, S. 33-52.

[46] DIN EN ISO 12571: Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften. April 2000.

[47] Zirkelbach, D.; Künzel, H.M.; Schafaczek, B. und Borsch-Laaks, R.: Dampfkonvektion wird berechenbar – Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen. Proceedings 30. AIVC Conference, Berlin 2009.

[48] DIN 68800: Holzschutz im Hochbau. Beuth Verlag, Berlin 1996.

[49] Fiori, M.; Paolini, R.: Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle costruzioni e Ambiente costruito. The green roof monitoring is funded by the Italian Ministry of Research, project PRIN SENSE "Smart Building Envelope for Sustainable Urban Environment".

11 Tabellen

Tabelle 1:
Konstruktionsaufbauten über der Betondecke und der Dachabdichtung am Standort Holzkirchen.

Dach	Aufbau
Dach 1 A/B 1985 – 2004	80 mm Substrat Geotextilvlies 50 mm Drainageschicht (Blähton) 100 mm XPS-Dämmung (2 versch. Hersteller A/B)
Dach 2 A/B 1985 – 2004	80 mm Substrat Geotextilvlies keine Drainageschicht 100 mm XPS-Dämmung (2 versch. Hersteller A/B)
Dach 3 1985 – 2004	80 mm Substrat Geotextilvlies Dränplatte 80 mm XPS-Dämmung
Dach 4 1985 – 2004	80 mm Substrat Geotextilvlies bitumengebundene Dränplatte 60 mm XPS-Dämmung
Dach 5 1995 – 1996	80 mm Substrat Geotextilvlies 50 mm Drainageschicht (Kies) 100 mm XPS-Dämmung
Dach 6 1995 – 1996	80 mm Substrat Geotextilvlies 50 mm Drainageschicht (Blähton) 100 mm XPS-Dämmung

Tabelle 2:
Angepasste Materialkennwerte für die Berechnung der generischen Substratschicht.

Materialkenndaten	**Wert**
Rohdichte	1500 kg/m³
Porosität	0,5 m³/m³
Wärmekapazität, trocken	1500 J/kgK
Wärmeleitfähigkeit, trocken, 10 °C	0,9 W/mK
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	5
Bezugsfeuchtegehalt Freie Wassersättigung	12 kg/m³ 300 kg/m³
Flüssigtransportkoeffizienten D_{w0} D_{ws} D_{ww}	 1E-10 m²/s 1E-6 m²/s 1E-7 m²/s

Tabelle 3:
Bauteilaufbauten der vier Versuchsfelder der Freilandversuche am Standort der MFPA Leipzig [2].

Dach	**Aufbau**
Feldbereich 3.1	80 mm extensive Begrünung PVC-Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies 22 mm OSB/3-Platte 220 mm Isofloc Zellulosedämmung 15 mm OSB/3-Platte
Feldbereich 3.2	80 mm extensive Begrünung PVC-Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies 22 mm OSB/3-Platte 220 mm Isofloc Zellulosedämmung feuchtevariable Dampfbremse INTELLO®
Feldbereich 4.1	80 mm extensive Begrünung PVC-Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies 22 mm OSB/3-Platte 220 mm Mineralwolledämmung 15 mm OSB/3-Platte
Feldbereich 4.2	80 mm extensive Begrünung PVC-Abdichtungsbahn schwarz inkl. Schutzvlies 22 mm OSB/3-Platte 220 mm Mineralwolledämmung feuchtevariable Dampfbremse INTELLO®

Tabelle 4:
Bauteilaufbau de Gründach-Versuchsfeldes der Holzforschung Austria [40].

Dach	**Aufbau**
Gründach (A5)	80 mm extensive Begrünung + Schutzvlies EPDM schwarz – mechanisch befestigt 18 mm OSB/3-Platte 280 mm Glaswolle feuchteadaptive Dampfbremse (pro clima INTELLO ®) 15 mm MDF-Platte

Tabelle 5:
Bauteilaufbauten der sechs Versuchsfelder der Freilandversuche am Standort des ZUB in Kassel [1].

Dach	Aufbau
Feld I	Dachabdichtung 200 mm Mineralfaserdämmung Dampfbremse s_d = 100 m 20 mm Holzschalung
Feld II	20 mm Vegetationsmatte 80 mm Substratschicht Dachabdichtung 200 mm Mineralfaserdämmung Dampfbremse s_d = 100 m 20 mm Holzschalung
Feld III	50 - 70 mm Grassoden 150 mm Substratschicht Dachabdichtung 200 mm Mineralfaserdämmung Dampfbremse s_d = 100 m 20 mm Holzschalung
Feld IV	20 mm Vegetationsmatte 150 mm Substratschicht Dachabdichtung 200 mm Mineralfaserdämmung Dampfbremse s_d = 100 m 20 mm Holzschalung
Feld V	50 - 70 mm Grassoden 150 mm Substratschicht Dachabdichtung 100 mm Mineralfaserdämmung Dampfbremse s_d = 100 m 20 mm Holzschalung
Feld VI	20 mm Vegetationsmatte 80 mm Substratschicht Dachabdichtung 100 mm Mineralfaserdämmung Dampfbremse s_d = 100 m 20 mm Holzschalung

Tabelle 6:
Bauteilaufbauten der vier neu erstellten Versuchsflächen am Standort Holzkirchen.

Dach	Aufbau
Dach 1 (1-Schicht-Aufbau) Optigrün-System Spardach Lösung 2	Vegetationsmatte 80 mm Optigrün-Extensiv-Einschichtsubstrat Typ M 3,6 mm Optigrün-Schutz- und Speichervlies Typ RMS 300 0,8 mm Wurzelschutzbahn Dachabdichtung (WOLFIN GWSK) 100 mm EPS-Dämmung Dachbahn (perforiert) 40 mm EPS-Dämmung Dampfsperre 200 mm Betonfertigteildecke
Dach 2 (2-Schicht-Aufbau) Optigrün-System Leichtdach Lösung 1	Vegetationsmatte 30 mm Optigrün-Leichtsubstrat Typ L 25 mm Optigrün-Festkörperdränage Typ FKD 25 3,6 mm Optigrün-Schutz- und Speichervlies Typ RMS 300 0,8 mm Wurzelschutzbahn Dachabdichtung (WOLFIN GWSK) 100 mm EPS-Dämmung Dachbahn (perforiert) 40 mm EPS-Dämmung Dampfsperre 200 mm Betonfertigteildecke
Dach 3 (3-Schicht-Aufbau, neu) Optigrün-System Naturdach Lösung 1	Vegetationsmatte 100 mm Optigrün-Extensivsubstrat Typ E (neu) 1,1 mm Optigrün Filtervlies Typ 105 40 mm Optigrün-Festkörperdränage Typ FKD 40 3,6 mm Optigrün-Schutz- und Speichervlies Typ RMS 300 0,8 mm Wurzelschutzbahn Dachabdichtung (WOLFIN GW, s_d = 20 m) 100 mm organische Schüttung Dachbahn (perforiert) 40 mm EPS-Dämmung Dampfsperre 200 mm Betonfertigteildecke
Dach 4 (3-Schicht-Aufbau, alt) Optigrün-System Naturdach Lösung 1	eingewachsene Bepflanzung 100 mm Optigrün-Extensivsubstrat Typ E (alt) 1,1 mm Optigrün-Filtervlies Typ 105 40 mm Optigrün-Festkörperdränage Typ FKD 40 3,6 mm Optigrün-Schutz- und Speichervlies Typ RMS 300 0,8 mm Wurzelschutzbahn Dachabdichtung (WOLFIN GW, s_d = 20 m) 100 mm organische Schüttung Dachbahn (perforiert) 40 mm EPS-Dämmung Dampfsperre 200 mm Betonfertigteildecke

Tabelle 7:
Übersicht der Materialkennwerte des „Extensiv-Einschichtsubstrats Typ M“ der Fa. Optigrün.

Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis Einzelwerte	Ergebnis Mittelwert
F090_M4 F090_M5	Rohdichte lufttrocken	kg/m³	1144 1136	900
F090_M1 F090_M2 F090_M3	Diffusionswider-standszahl μ (23-50/93)	-	3,3 3,2 3,5	3,3
F090_M4 F090_M5	Wasseraufnahme-koeffizient w_{20min}	kg/(m²√h)	23,1 24,7	23,9*)
F090_M4 F090_M5	Wasseraufnahme-koeffizient w_{1h}	kg/(m²√h)	15,9 16,9	16,4*)
F090_M4 F090_M5	Wasseraufnahme-koeffizient w_{4h}	kg/(m²√h)	8,6 9,0	8,8*)
F090_M10 F090_M11 F090_M12	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 50 % r.F.	Vol.-%	0,88 1,02 0,78	0,89
F090_M13 F090_M14 F090_M15	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 80 % r.F.	Vol.-%	1,33 1,34 1,13	1,27
F090_M16 F090_M17 F090_M18	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 93 % r.F.	Vol.-%	1,63 1,62 1,50	1,58
F090_M19 F090_M20 F090_M21	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 97 % r.F.	Vol.-%	2,00 2,09 1,78	1,96
F090_M4 F090_M5	Freie Wassersättigung	Vol.-%	44,3 45,5	44,9

*) nach 20 Minuten durchfeuchtet

Aus Labormessung ermittelte Kapillartransportkoeffizienten		
Kapillartransportkoeffizient	**Wassergehalt [kg/m³]**	**DW [m²/s]**
für Saugen	12,7	3,6 e-9
	449	3,0 e-6
für Weiterleitung / Trocknung	12,7	1,0 e-14
	76,2	1,0 e-14
	100	1,3 e-10
	449	9,9 e-6

Tabelle 8:
Übersicht der Materialkennwerte des „Leichtsubstrat Typ L“ der Fa. Optigrün.

Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis Einzelwerte	Ergebnis Mittelwert
F090_L16 F090_L17 F090_L18	Rohdichte lufttrocken	kg/m³	428 415 372	405
F090_L13 F090_L14 F090_L15	Diffusions-widerstandszahl μ (23-50/93)	-	2,9 3,0 3,1	3,0
F090_L16 F090_L17 F090_L18	Wasseraufnahme-koeffizient w_{10min}	kg/(m²√h)	33,1 36,8 43,3	37,7*)
F090_L16 F090_L17 F090_L18	Wasseraufnahme-koeffizient w_{1h}	kg/(m²√h)	18,8 19,1 19,0	19,0*)
F090_L16 F090_L17 F090_L18	Wasseraufnahme-koeffizient w_{4h}	kg/(m²√h)	9,5 9,4 8,8	9,2*)
F090_L1 F090_L2 F090_L3	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 50 % r.F.	Vol.-%	0,36 0,33 0,33	0,34
F090_L4 F090_L5 F090_L6	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 80 % r.F.	Vol.-%	0,41 0,43 0,42	0,42
F090_L7 F090_L8 F090_L9	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 93 % r.F.	Vol.-%	0,56 0,56 0,59	0,57
F090_L10 F090_L11 F090_L12	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 97 % r.F.	Vol.-%	0,92 0,89 0,84	0,88
F090_L16 F090_L17 F090_L18	Freie Wassersättigung	Vol.-%	24,9 27,2 25,2	41,6

*) nach 10 Minuten durchfeuchtet

Aus Labormessung ermittelte Kapillartransportkoeffizienten		
Kapillartransportkoeffizient	**Wassergehalt [kg/m³]**	**DW [m²/s]**
für Saugen	4,2	9,3 e-9
	416	8,7 e-6
für Weiterleitung / Trocknung	4,2	1,0 e-14
	77,5	1,0 e-14
	100	4,0 e-10
	416	1,8 e-9

Tabelle 9:
Übersicht der Materialkennwerte des „Extensiv-Mehrschichtsubstrats Typ E (neu)“ der Fa. Optigrün.

Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis Einzelwerte	Ergebnis Mittelwert
F090_N4 F090_N5 F090_N6	Rohdichte Trocknung bei 40 °C	kg/m³	892 936 908	912
F090_N1 F090_N2 F090_N3	Diffusions-widerstandszahl μ (23-50/93)	-	3,2 3,2 3,7	3,4
F090_N4 F090_N5 F090_N6	Wasseraufnahme-koeffizient w_{1h}	kg/(m²√h)	18,6 16,6 21,3	18,8
F090_N4 F090_N5 F090_N6	Wasseraufnahme-koeffizient w_{4h}	kg/(m²√h)	11,2 10,2 12,5	11,3*)
F090_N4 F090_N5 F090_N6	Wasseraufnahme-koeffizient w_{24h}	kg/(m²√h)	5,2 4,9 5,6	5,2*)
F090_N10 F090_N11 F090_N12	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 50 % r.F.	Vol.-%	0,69 0,70 0,65	0,68
F090_N13 F090_N14 F090_N15	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 80 % r.F.	Vol.-%	1,05 1,22 0,92	1,06
F090_N16 F090_N17 F090_N18	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 93 % r.F.	Vol.-%	1,36 1,44 1,43	1,41
F090_N19 F090_N20 F090_N21	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 97 % r.F.	Vol.-%	2,16 2,45 1,95	2,19
F090_N4 F090_N5 F090_N6	Freie Wassersättigung	Vol.-%	69,1 73,6 72,5	39,9

*) nach 4 h durchfeuchtet; andere Prüfanordnung

Aus Labormessung ermittelte Kapillartransportkoeffizienten		
Kapillartransportkoeffizient	**Wassergehalt [kg/m³]**	**DW [m²/s]**
für Saugen	10,6	2,8 e-9
	399	2,3 e-6
für Weiterleitung / Trocknung	10,6	9,9 e-10
	126	1,6 e-9
	399	3,0 e-7

Tabelle 10:
Übersicht der Materialkennwerte des „Extensiv-Mehrschichtsubstrats Typ E (ausgebaut, durchwurzelt)“ der Fa. Optigrün.

Probe Nr.	Eigenschaft	Einheit	Ergebnis Einzelwerte	Ergebnis Mittelwert
F090_A4 F090_A5 F090_A6	Rohdichte Trocknung bei 40 °C	kg/m³	1132 1158 1153	1148
F090_A1 F090_A2 F090_A3	Diffusions-widerstandszahl μ (23-50/93)	-	3,9 4,0 3,3	3,7
F090_A4 F090_A5 F090_A6	Wasseraufnahme-koeffizient w_{15min}	kg/(m²√h)	35,5 37,5 36,3	36,4*)
F090_A4 F090_A5 F090_A6	Wasseraufnahme-koeffizient w_{1h}	kg/(m²√h)	19,4 21,4 20,0	20,3*)
F090_A4 F090_A5 F090_A6	Wasseraufnahme-koeffizient w_{4h}	kg/(m²√h)	10,2 10,9 10,5	10,5*)
F090_A10 F090_A11 F090_A12	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 50 % r.F.	Vol.-%	1,53 1,41 1,16	1,37
F090_A13 F090_A14 F090_A15	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 80 % r.F.	Vol.-%	2,17 1,93 2,34	2,15
F090_A16 F090_A17 F090_A18	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 93 % r.F.	Vol.-%	2,52 2,85 3,04	2,80
F090_A19 F090_A20 F090_A21	Bezugsfeuchtegehalt bei 23 °C / 97 % r.F.	Vol.-%	3,49 3,75 3,17	3,47
F090_A4 F090_A5 F090_A6	Freie Wassersättigung	Vol.-%	44,0 45,4 47,2	47,8

*) nach 15 Minuten durchfeuchtet

Aus Labormessung ermittelte Kapillartransportkoeffizienten		
Kapillartransportkoeffizient	**Wassergehalt [kg/m³]**	**DW [m²/s]**
für Saugen	21,5	8,4 e-9
	478	6,1 e-6
für Weiterleitung / Trocknung	21,5	5,0 e-11
	103	1,0 e-9
	478	1,2 e-9

Tabelle 11:
Darstellung der gemessenen und berechneten Mitteltemperaturen über ein Jahr bzw. über die Sommer- und Wintermonate für Dachaufbau 1.

Dachaufbau 1 (Einschichtaufbau mit 8 cm Substrat)	**Messposition**		
	unter Vegetationsmatte	Substratmitte	unter Schutzvlies
Jahresmitteltemperatur 1.2.2012 – 1.2.2013			
Messwert SW [°C]	9,30	9,87	9,93
Messwert NO [°C]	9,31	9,54	9,78
Messwert SW+NO [°C]	9,31	9,71	9,86
Berechnung [°C]	8,55	8,67	8,88
Differenz [K]	**-0,76**	**-1,04**	**-0,98**
Mitteltemperatur Sommer (Jun / Jul / Aug)			
Messwert SW [°C]	19,33	19,68	19,55
Messwert NO [°C]	19,11	19,20	19,33
Messwert SW+NO [°C]	19,22	19,44	19,44
Berechnung [°C]	18,38	18,46	18,56
Differenz [K]	**-0,84**	**-0,98**	**-0,88**
Mitteltemperatur Winter (Dez / Jan / Feb)			
Messwert SW [°C]	-0,78	0,06	0,35
Messwert NO [°C]	-0,35	-0,06	0,32
Messwert SW+NO [°C]	-0,57	0,00	0,34
Berechnung [°C]	-2,24	-2,07	-1,73
Differenz [K]	**-1,67**	**-2,07**	**-2,07**

Tabelle 12:
Darstellung der gemessenen und berechneten Mitteltemperaturen über ein Jahr bzw. über die Sommer- und Wintermonate für Dachaufbau 2.

Dachaufbau 2 (Zweischichtaufbau mit 3 cm Substrat)	**Messposition**	
	unter Vegetationsmatte	unter Schutzvlies
Jahresmitteltemperatur 1.2.2012 – 1.2.2013		
Messwert SW [°C]	9,07	10,55
Messwert NO [°C]	9,31	10,31
Messwert SW+NO [°C]	9,19	10,43
Berechnung [°C]	8,80	9,02
Differenz [K]	**-0,39**	**-1,41**
Mitteltemperatur Sommer (Jun / Jul / Aug)		
Messwert SW [°C]	19,05	20,23
Messwert NO [°C]	18,99	19,98
Messwert SW+NO [°C]	19,02	20,11
Berechnung [°C]	18,92	19,03
Differenz [K]	**-0,10**	**-1,08**
Mitteltemperatur Winter (Dez / Jan / Feb)		
Messwert SW [°C]	-0,83	0,91
Messwert NO [°C]	-0,28	0,90
Messwert SW+NO [°C]	-0,56	0,91
Berechnung [°C]	-2,16	-1,76
Differenz [K]	**-1,60**	**-2,67**

Tabelle 13:
Darstellung der gemessenen und berechneten Mitteltemperaturen über ein Jahr bzw. über die Sommer- und Wintermonate für Dachaufbau 3.

Dachaufbau 3 (Dreischichtaufbau mit 10 cm neuem Substrat)	**Messposition**		
	unter Vegetationsmatte	unter Substrat	unter Schutzvlies
Jahresmitteltemperatur 1.2.2012 – 1.2.2013			
Messwert SW [°C]	8,42	8,92	9,58
Messwert NO [°C]	9,26	9,12	9,84
Messwert SW+NO [°C]	8,84	9,02	9,71
Berechnung [°C]	8,42	8,81	9,09
Differenz [K]	**-0,42**	**-0,21**	**-0,62**
Mitteltemperatur Sommer (Jun / Jul / Aug)			
Messwert SW [°C]	17,70	17,82	17,74
Messwert NO [°C]	19,19	18,36	18,31
Messwert SW+NO [°C]	18,45	18,09	18,03
Berechnung [°C]	18,12	18,41	18,55
Differenz [K]	**-0,33**	**0,32**	**0,52**
Mitteltemperatur Winter (Dez / Jan / Feb)			
Messwert SW [°C]	-0,90	0,19	1,66
Messwert NO [°C]	-0,44	0,01	1,47
Messwert SW+NO [°C]	-0,67	0,10	1,57
Berechnung [°C]	-2,33	-2,03	-1,76
Differenz [K]	**-1,66**	**-2,13**	**-3,33**

Tabelle 14:
Darstellung der gemessenen und berechneten Mitteltemperaturen über ein Jahr bzw. über die Sommer- und Wintermonate für Dachaufbau 4.

Dachaufbau 4 (Dreischichtaufbau mit 10 cm eingewachsenem Substrat)	**Messposition**		
	unter eingewachsenem Substrat	unter Substrat	unter Schutzvlies
Jahresmitteltemperatur 1.2.2012 – 1.2.2013			
Messwert SW [°C]	9,39	9,74	10,21
Messwert NO [°C]	9,47	9,42	10,02
Messwert SW+NO [°C]	9,43	9,58	10,12
Berechnung [°C]	8,84	9,09	9,46
Differenz [K]	**-0,59**	**-0,49**	**-0,66**
Mitteltemperatur Sommer (Jun / Jul / Aug)			
Messwert SW [°C]	18,88	19,15	18,86
Messwert NO [°C]	19,11	18,65	18,55
Messwert SW+NO [°C]	19,00	18,90	18,71
Berechnung [°C]	18,53	18,65	18,79
Differenz [K]	**-0,47**	**-0,25**	**0,08**
Mitteltemperatur Winter (Dez / Jan / Feb)			
Messwert SW [°C]	-0,25	0,21	1,33
Messwert NO [°C]	0,01	0,30	1,61
Messwert SW+NO [°C]	-0,12	0,26	1,47
Berechnung [°C]	-1,79	-1,41	-0,74
Differenz [K]	**-1,67**	**-1,67**	**-2,21**

Tabelle 15:
Darstellung der für eine hygrothermische Simulation notwendigen Materialkennwerte des generischen Substrats.

generisches Substrat		
Rohdichte	1500	kg/m³
Porosität	0.50	m³/m³
Wärmekapazität trocken	1500	J/(kgK)
Wärmeleitfähigkeit, 10 °C		
trocken	0.90	W/(mK)
freie Sättigung	1.50	W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	5.00	-
Wärmeleitfähigkeitszuschlag	0.0002	W/(mK²)
Feuchtespeicherfunktion		
50 % r.F.	3.09	kg/m³
80 % r.F.	12.00	kg/m³
93 % r.F.	36.47	kg/m³
95 % r.F.	49.57	kg/m³
99 % r.F.	152.31	kg/m³
100 % r.F.	300.00	kg/m³
Flüssigtransportkoeffizient, Saugen		
12.00 kg/m³	1 e-10	m²/s
300.00 kg/m³	1 e-6	m²/s
Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilung		
12.00 kg/m³	1 e-10	m²/s
300.00 kg/m³	1 e-7	m²/s

Tabelle 16:
Darstellung der für eine hygrothermische Simulation notwendigen Materialkennwerte der Pflanzschicht.

Pflanzschicht		
Rohdichte	1500	kg/m³
Porosität	0.50	m³/m³
Wärmekapazität trocken	1000	J/(kgK)
Wärmeleitfähigkeit, 10 °C		
trocken	0.20	W/(mK)
maximale Sättigung	0.80	W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	5.00	-
Wärmeleitfähigkeitszuschlag	0.0002	W/(mK²)
Feuchtespeicherfunktion		
50 % r.F.	3.09	kg/m³
80 % r.F.	12.00	kg/m³
93 % r.F.	36.47	kg/m³
95 % r.F.	49.57	kg/m³
99 % r.F.	152.31	kg/m³
100 % r.F.	300.00	kg/m³
Flüssigtransportkoeffizient, Saugen		
12.00 kg/m³	1 e-10	m²/s
300.00 kg/m³	1 e-6	m²/s
Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilung		
12.00 kg/m³	1 e-10	m²/s
300.00 kg/m³	1 e-7	m²/s

Tabelle 17:
Darstellung der für eine hygrothermische Simulation notwendigen Materialkennwerte des Optigrün-Einschichtsubstrats Typ M.

Optigrün-Einschichtsubstrat Typ M		
Rohdichte	900	kg/m³
Porosität	0.65	m³/m³
Wärmekapazität trocken	1000	J/(kgK)
Wärmeleitfähigkeit, 10 °C		
trocken	0.40	W/(mK)
maximale Sättigung	1.00	W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	3.30	-
Wärmeleitfähigkeitszuschlag	0.0002	W/(mK²)
Feuchtespeicherfunktion		
50 % r.F.	8.90	kg/m³
80 % r.F.	12.70	kg/m³
93 % r.F.	15.80	kg/m³
95 % r.F.	17.40	kg/m³
99 % r.F.	26.10	kg/m³
100 % r.F.	449.00	kg/m³
Flüssigtransportkoeffizient, Saugen		
12.70 kg/m³	3.6 e-9	m²/s
449.00 kg/m³	3.0 e-6	m²/s
Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilung		
12.70 kg/m³	1 e-14	m²/s
76.20 kg/m³	1 e-14	m²/s
100.00 kg/m³	1.3 e-10	m²/s
449.00 kg/m³	9.9 e-6	m²/s

Tabelle 18:
Darstellung der für eine hygrothermische Simulation notwendigen Materialkennwerte des Optigrün-Leichtsubstrats Typ L.

Optigrün-Leichtsubstrat Typ L		
Rohdichte	405	kg/m³
Porosität	0.82	m³/m³
Wärmekapazität trocken	1000	J/(kgK)
Wärmeleitfähigkeit, 10 °C		
trocken	0.40	W/(mK)
maximale Sättigung	1.00	W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	3.00	-
Wärmeleitfähigkeitszuschlag	0.0002	W/(mK²)
Feuchtespeicherfunktion		
50 % r.F.	3.40	kg/m³
80 % r.F.	4.20	kg/m³
93 % r.F.	5.70	kg/m³
95 % r.F.	7.30	kg/m³
99 % r.F.	13.90	kg/m³
100 % r.F.	416.00	kg/m³
Flüssigtransportkoeffizient, Saugen		
4.20 kg/m³	9.3 e-9	m²/s
416.00 kg/m³	8.7 e-6	m²/s
Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilung		
4.20 kg/m³	1 e-14	m²/s
77.50 kg/m³	1 e-14	m²/s
100.00 kg/m³	4 e-10	m²/s
416.00 kg/m³	1.8 e-9	m²/s

Tabelle 19:
Darstellung der für eine hygrothermische Simulation notwendigen Materialkennwerte des neuen Optigrün-Mehrschichtsubstrats Typ E.

Optigrün-Mehrschichtsubstrat Typ E (neu)		
Rohdichte	912	kg/m³
Porosität	0.65	m³/m³
Wärmekapazität trocken	1000	J/(kgK)
Wärmeleitfähigkeit, 10 °C		
trocken	0.40	W/(mK)
maximale Sättigung	1.00	W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	3.40	-
Wärmeleitfähigkeitszuschlag	0.0002	W/(mK²)
Feuchtespeicherfunktion		
50 % r.F.	6.80	kg/m³
80 % r.F.	10.60	kg/m³
93 % r.F.	14.10	kg/m³
95 % r.F.	17.40	kg/m³
99 % r.F.	30.80	kg/m³
100 % r.F.	399.00	kg/m³
Flüssigtransportkoeffizient, Saugen		
10.60 kg/m³	2.8 e-9	m²/s
399.00 kg/m³	2.3 e-6	m²/s
Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilung		
10.60 kg/m³	9.9 e-10	m²/s
126.00 kg/m³	1.6 e-9	m²/s
399.00 kg/m³	3 e-7	m²/s

Tabelle 20:
Darstellung der für eine hygrothermische Simulation notwendigen Materialkennwerte des eingewachsenen Optigrün-Mehrschichtsubstrats Typ E.

Optigrün-Mehrschichtsubstrat Typ E (eingewachsen)		
Rohdichte	1148	kg/m³
Porosität	0.65	m³/m³
Wärmekapazität trocken	1000	J/(kgK)
Wärmeleitfähigkeit, 10 °C		
trocken	0.40	W/(mK)
maximale Sättigung	1.00	W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	3.70	-
Wärmeleitfähigkeitszuschlag	0.0002	W/(mK²)
Feuchtespeicherfunktion		
50 % r.F.	13.70	kg/m³
80 % r.F.	21.50	kg/m³
93 % r.F.	28.00	kg/m³
95 % r.F.	30.60	kg/m³
99 % r.F.	48.00	kg/m³
100 % r.F.	478.00	kg/m³
Flüssigtransportkoeffizient, Saugen		
21.50 kg/m³	8.4 e-9	m²/s
478.00 kg/m³	6.1 e-6	m²/s
Flüssigtransportkoeffizient, Weiterverteilung		
21.50 kg/m³	5 e-11	m²/s
103.00 kg/m³	1 e-9	m²/s
478.00 kg/m³	1.2 e-9	m²/s

Tabelle 21:
Darstellung der für eine hygrothermische Simulation notwendigen Materialkennwerte der unverfüllten Drän- und Speicherschicht.

Drän- und Speicherschicht (unverfüllt)		
Rohdichte	60	kg/m³
Porosität	0.95	m³/m³
Wärmekapazität trocken	850	J/(kgK)
Wärmeleitfähigkeit, 10 °C		
trocken	0.30	W/(mK)
maximale Sättigung	0.90	W/(mK)
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	1.30	-
Wärmeleitfähigkeitszuschlag	0.0002	W/(mK²)

Tabelle 22:
Darstellung der maximalen Wassergehalte in der OSB-Platte für das Leichtbaudach mit „ISOVER GW Integra ZKF-035“ und raumseitiger „INTELLO“ in Abhängigkeit vom Gründachaufbau und der Überdämmungsdicke.

Unter-konstruktion	Maximaler Wassergehalt in der OSB-Platte nach 15 Jahren					
	Einschichtaufbau mit 8cm Substrat	Zweischichtaufbau mit 3cm Leichtsubstrat und Dränelement	Dreischichtaufbau mit 10cm Substrat (neu), Filtervlies und Dränelement	Dreischichtaufbau mit 10cm Substrat (alt), Filtervlies und Dränelement	gen. Modell mit 8cm Substrat	gen. Modell mit 10cm Substrat	gen. Modell mit 10cm Substrat und Dränelement
20 cm Integra ZKF-035 INTELLO 0 cm Überdämmung	19,9%	17,3%	21,4%	19,9%	19,2%	19,9%	20,4%
20 cm Integra ZKF-035 INTELLO 5 cm Überdämmung (≙ 25 %)	16,7%	15,6%	17,0%	16,4%	16,2%	16,4%	16,6%
40 cm Integra ZKF-035 INTELLO 0 cm Überdämmung	22,5%	19,0%	24,9%	22,3%	21,2%	22,0%	22,8%
40 cm Integra ZKF-035 INTELLO 5 cm Überdämmung (≙ 12,5 %)	19,5%	18,1%	19,9%	19,0%	18,7%	18,9%	19,2%
40 cm Integra ZKF-035 INTELLO 10 cm Überdämmung (≙ 25 %)	17,6%	16,8%	17,8%	17,3 %	17,1%	17,2%	17,4%
40 cm Integra ZKF-035 INTELLO 12 cm Überdämmung (≙ 30 %)	17,0%	16,4%	17,2%	16,7%	16,6%	16,7%	16,8%

Tabelle 23:
Darstellung der maximalen Wassergehalte in der OSB-Platte für das Leichtbaudach mit „ISOVER GW Integra ZKF-035“ und raumseitiger „Vario Xtra“ in Abhängigkeit vom Gründachaufbau und der Überdämmungsdicke.

Unter-konstruktion	Maximaler Wassergehalt in der OSB-Platte nach 15 Jahren						
	Einschichtaufbau mit 8cm Substrat	Zweischichtaufbau mit 3cm Leichtsubstrat und Dränelement	Dreischichtaufbau mit 10cm Substrat (neu), Filtervlies und Dränelement	Dreischichtaufbau mit 10cm Substrat (alt), Filtervlies und Dränelement	gen. Modell mit 8cm Substrat	gen. Modell mit 10cm Substrat	gen. Modell mit 10cm Substrat und Dränelement
20 cm Integra ZKF-035 Vario Xtra 0 cm Überdämmung	20,1%	16,9%	22,2%	20,6%	19,4%	20,5%	21,1%
20 cm Integra ZKF-035 Vario Xtra 5 cm Überdämmung (≙ 25 %)	16,8%	15,7%	17,0%	16,5%	16,4%	16,6%	16,7%
40 cm Integra ZKF-035 Vario Xtra 0 cm Überdämmung	23,7%	19,4%	26,1%	23,7%	22,3%	23,3%	24,4%
40 cm Integra ZKF-035 Vario Xtra 5 cm Überdämmung (≙ 12,5 %)	19,8%	18,6%	20,1%	19,4%	19,1%	19,3%	19,5%
40 cm Integra ZKF-035 Vario Xtra 10 cm Überdämmung (≙ 25 %)	17,7%	17,1%	17,7%	17,4%	17,2%	17,3%	17,4%
40 cm Integra ZKF-035 Vario Xtra 12 cm Überdämmung (≙ 30 %)	17,0%	16,5%	17,1%	16,7%	16,6%	16,7%	16,7%

Tabelle 24:
Darstellung der maximalen Wassergehalte in der OSB-Platte für das Leichtbaudach mit „ISOVER GW Integra ZKF-035“ und raumseitiger OSB-Platte in Abhängigkeit vom Gründachaufbau und der Überdämmungsdicke.

Unter-konstruktion	Maximaler Wassergehalt in der OSB-Platte nach 15 Jahren						
	Einschichtaufbau mit 8cm Substrat	Zweischichtaufbau mit 3cm Leichtsubstrat und Dränelement	Dreischichtaufbau mit 10cm Substrat (neu), Filtervlies und Dränelement	Dreischichtaufbau mit 10cm Substrat (alt), Filtervlies und Dränelement	gen. Modell mit 8cm Substrat	gen. Modell mit 10cm Substrat	gen. Modell mit 10cm Substrat und Dränelement
40 cm Integra ZKF-035 OSB 0 cm Überdämmung	45,7%	33,6%	49,4%	42,4%	38,5%	40,6%	43,0%
40 cm Integra ZKF-035 OSB 5 cm Überdämmung (≙ 12,5 %)	25,8%	23,9%	25,7%	24,3%	23,9%	24,0%	24,2%
40 cm Integra ZKF-035 OSB 10 cm Überdämmung (≙ 25 %)	20,5%	20,0%	20,5%	20,0%	19,7%	19,7%	19,8%
40 cm Integra ZKF-035 OSB 12 cm Überdämmung (≙ 30 %)	19,4%	19,0%	19,5%	19,1%	18,8%	18,8%	18,9%
40 cm Integra ZKF-035 OSB 15 cm Überdämmung (≙ 37,5 %)	18,2%	17,9%	18,3%	17,9%	17,7%	17,7%	17,8%
40 cm Integra ZKF-035 OSB 18 cm Überdämmung (≙ 45 %)	17,3%	17,0%	17,3%	17,0%	16,8%	16,8%	16,9%

Tabelle 25:
Darstellung der maximalen Wassergehalte in der OSB-Platte für das Leichtbaudach mit „Isofloc L“ und raumseitiger „INTELLO“ in Abhängigkeit vom Gründachaufbau und der Überdämmungsdicke.

Unter-konstruktion	Maximaler Wassergehalt in der OSB-Platte nach 15 Jahren					
	Einschichtaufbau mit 8cm Substrat	Zweischichtaufbau mit 3cm Leichtsubstrat und Dränelement	Dreischichtaufbau mit 10cm Substrat (neu), Filtervlies und Dränelement	Dreischichtaufbau mit 10cm Substrat (alt), Filtervlies und Dränelement	gen. Modell mit 8cm Substrat	gen. Modell mit 10cm Substrat	gen. Modell mit 10cm Substrat und Dränelement
20 cm Isofloc L INTELLO 0 cm Überdämmung	23,6%	21,9%	24,1%	23,1%	23,0%	23,4%	23,5%
20 cm Isofloc L INTELLO 5 cm Überdämmung (≙ 25 %)	19,0%	18,3%	19,0%	18,6%	18,5%	18,6%	18,6%
20 cm Isofloc L INTELLO 10 cm Überdämmung (≙ 50 %)	16,5%	16,2%	16,5%	16,4%	16,3%	16,3%	16,3%
40 cm Isofloc L INTELLO 0 cm Überdämmung	24,8%	22,9%	25,4%	24,3%	23,9%	24,2%	24,5%
40 cm Isofloc L INTELLO 5 cm Überdämmung (≙ 12,5 %)	21,8%	21,1%	21,8%	21,3%	21,2%	21,3%	21,4%
40 cm Isofloc L INTELLO 10 cm Überdämmung (≙ 25 %)	19,2%	19,2%	19,6%	19,3%	19,1%	19,1%	19,2%
40 cm Isofloc L INTELLO 12 cm Überdämmung (≙ 30 %)	18,8%	18,5%	18,8%	18,5%	18,4%	18,4%	18,4%
40 cm Isofloc L INTELLO 15 cm Überdämmung (≙ 37,5 %)	17,9%	17,7%	17,9%	17,7%	17,6%	17,6%	17,6%

Tabelle 26:
Darstellung der maximalen Wassergehalte in der OSB-Platte für das Leichtbaudach mit „Isofloc L“ und raumseitiger „Vario Xtra“ in Abhängigkeit vom Gründachaufbau und der Überdämmungsdicke.

Unter-konstruktion	Maximaler Wassergehalt in der OSB-Platte nach 15 Jahren						
	Einschichtaufbau mit 8cm Substrat	Zweischichtaufbau mit 3cm Leichtsubstrat und Dränelement	Dreischichtaufbau mit 10cm Substrat (neu), Filtervlies und Dränelement	Dreischichtaufbau mit 10cm Substrat (alt), Filtervlies und Dränelement	gen. Modell mit 8cm Substrat	gen. Modell mit 10cm Substrat	gen. Modell mit 10cm Substrat und Dränelement
20 cm Isofloc L Vario Xtra 0 cm Überdämmung	24,5%	22,8%	24,8%	23,9%	23,0%	24,2%	24,2%
20 cm Isofloc L Vario Xtra 5 cm Überdämmung (≙ 25 %)	19,2%	18,6%	19,1%	18,8%	18,7%	18,7%	18,7%
20 cm Isofloc L Vario Xtra 10 cm Überdämmung (≙ 50 %)	16,5%	16,3%	16,4%	16,3%	16,3%	16,3%	16,2%
40 cm Isofloc L Vario Xtra 0 cm Überdämmung	25,0%	23,5%	25,3%	24,4%	24,1%	24,3%	24,5%
40 cm Isofloc L Vario Xtra 5 cm Überdämmung (≙ 12,5 %)	21,7%	21,3%	21,7%	21,3%	21,2%	21,2%	21,3%
40 cm Isofloc L Vario Xtra 10 cm Überdämmung (≙ 25 %)	19,5%	19,3%	19,4%	19,2%	19,1%	19,1%	19,1%
40 cm Isofloc L Vario Xtra 12 cm Überdämmung (≙ 30 %)	18,7%	18,6%	18,6%	18,5%	18,3%	18,3%	18,3%
40 cm Isofloc L Vario Xtra 15 cm Überdämmung (≙ 37,5 %)	17,8%	17,7%	17,7%	17,6%	17,5%	17,5%	17,5%

Tabelle 27:
Darstellung der maximalen Wassergehalte in der OSB-Platte für das Leichtbaudach mit „Isofloc L“ und raumseitiger OSB-Platte in Abhängigkeit vom Gründachaufbau und der Überdämmungsdicke.

Unter-konstruktion	Maximaler Wassergehalt in der OSB-Platte nach 15 Jahren						
	Einschichtaufbau mit 8cm Substrat	Zweischichtaufbau mit 3cm Leichtsubstrat und Dränelement	Dreischichtaufbau mit 10cm Substrat (neu), Filtervlies und Dränelement	Dreischichtaufbau mit 10cm Substrat (alt), Filtervlies und Dränelement	gen. Modell mit 8cm Substrat	gen. Modell mit 10cm Substrat	gen. Modell mit 10cm Substrat und Dränelement
40 cm Isofloc L OSB 0 cm Überdämmung	27,5%	25,0%	28,1%	26,9%	26,1%	26,6%	27,0%
40 cm Isofloc L OSB 5 cm Überdämmung (≙ 12,5 %)	22,8%	22,1%	22,9%	22,4%	22,1%	22,2%	22,3%
40 cm Isofloc L OSB 10 cm Überdämmung (≙ 25 %)	20,4%	19,9%	20,4%	20,0%	19,7%	19,8%	19,8%
40 cm Isofloc L OSB 12 cm Überdämmung (≙ 30 %)	19,4%	19,1%	19,5%	19,1%	18,9%	18,9%	19,0%
40 cm Isofloc L OSB 15 cm Überdämmung (≙ 37,5 %)	18,3%	18,1%	18,4%	18,1%	17,9%	17,9%	18,0%
40 cm Isofloc L OSB 18 cm Überdämmung (≙ 45 %)	17,5%	17,3%	17,6%	17,4%	17,2%	17,2%	17,3%

Tabelle 28:
Darstellung der erforderlichen Überdämmungsdicken in Abhängigkeit von der Zwischensparrendämmung und dem raumseitigen Diffusionswiderstand.

Dämmstärke unter Schalung		raumseitig	Höhe der empfohlenen Überdämmung*	
			Leichtsubstrat	Einschicht- und Mehrschichtsubstrat
Mineralwolledämmung	bis 20 cm (R = 5,7 m²K/W)	INTELLO	0 cm	5 cm
		Vario Xtra	0 cm	5 cm
	bis 40 cm (R = 11,4 m²K/W)	INTELLO	10 cm	12 cm
		Vario Xtra	10 cm	12cm
		OSB-Platte	15 cm	18 cm
Zellulosefaserdämmung	bis 20 cm (R = 5,4 m²K/W)	INTELLO	10 cm	10 cm
		Vario Xtra	10 cm	10 cm
	bis 40 cm (R = 11,8 m²K/W)	INTELLO	15 cm	15 cm
		Vario Xtra	15 cm	15 cm
		OSB-Platte	18 cm	18 cm

* für Standort Holzkirchen, Innenklima nach EN 15026, Infiltration: q = 3 m³/m²h und h = 5 m

12 Bilder





Bild 1:
Fotografische Aufnahme der Versuchsfelder am Standort Holzkirchen.
Oben: Ansicht von Osten kurz nach dem Aufbau
Unten: Ansicht von Süden ein paar Jahre später

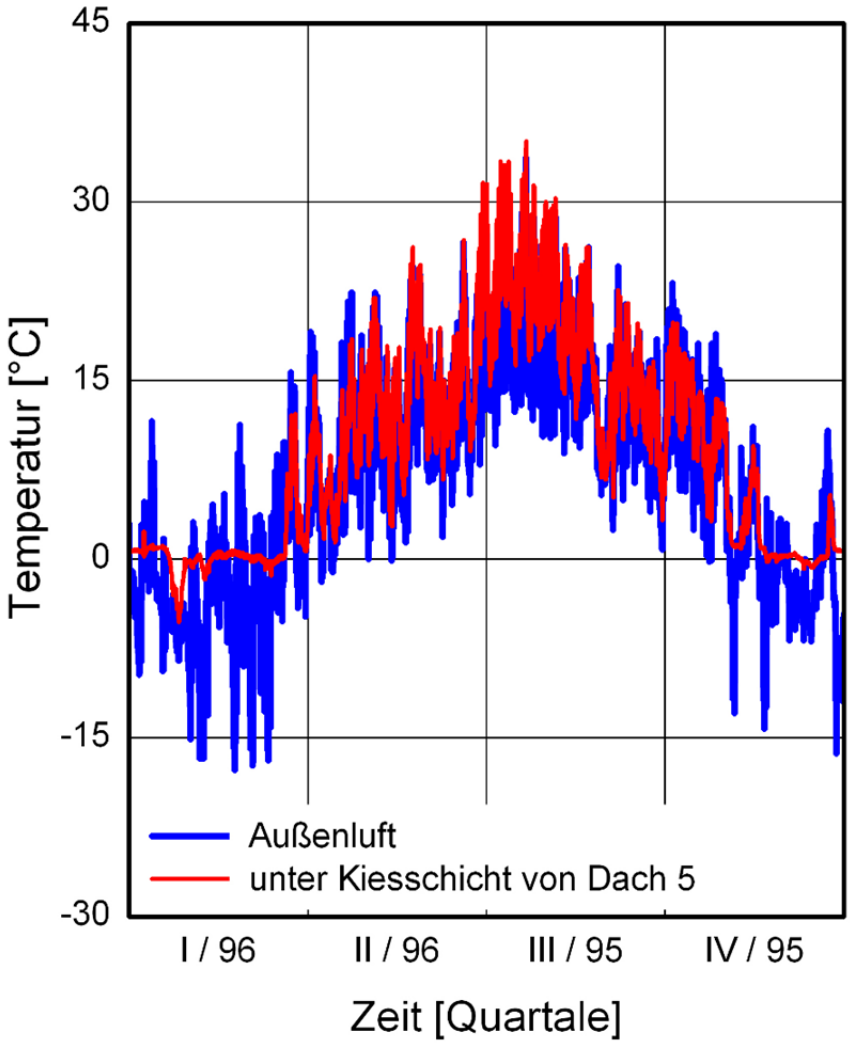


Bild 2:
Verlauf der gemessenen Temperaturen unter der Kiesschicht von Dach 5 in den Jahren 1995 und 1996 (aufgrund des Messzeitraums wurden die Quartale I und II von 1996 mit den Quartalen III und IV von 1995 kombiniert).

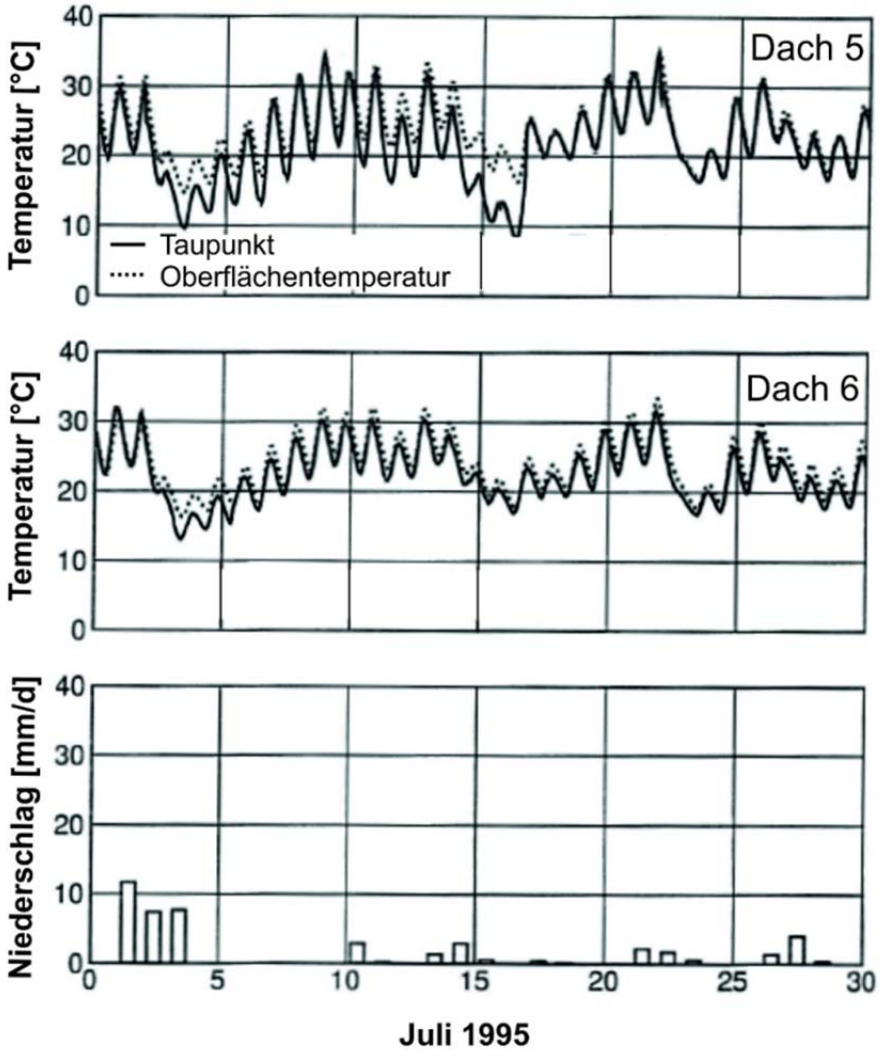


Bild 3:
Gemessener Verlauf von Temperatur (gestrichelte Linie) und Taupunkttemperatur (durchgezogene Linie) unter der Kiesschicht von Dach 5 (oben), unter der Blähtonschicht von Dach 6 (mitte) sowie die gemessene Niederschlagsmenge für Juli 1995.

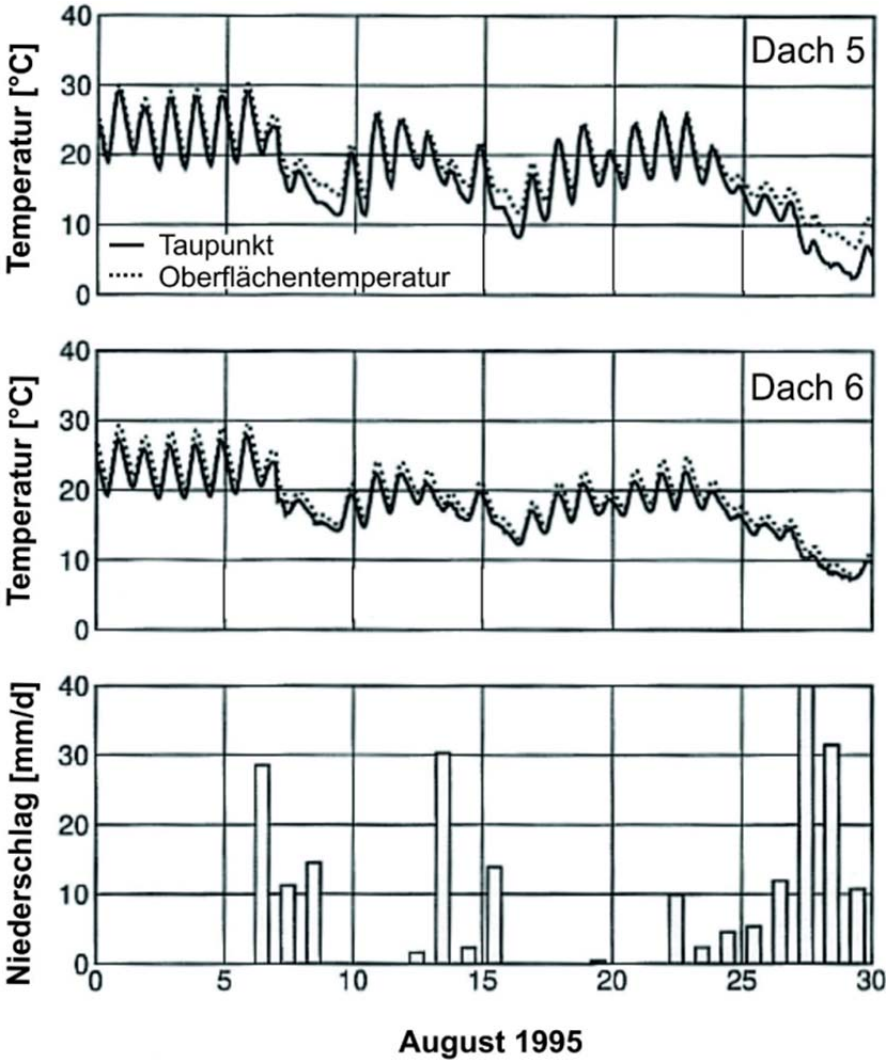


Bild 4:
Gemessener Verlauf von Temperatur (gestrichelte Linie) und Taupunkttemperatur (durchgezogene Linie) unter der Kiesschicht von Dach 5 (oben), unter der Blähtonschicht von Dach 6 (mitte) sowie die gemessene Niederschlagsmenge für August 1995.

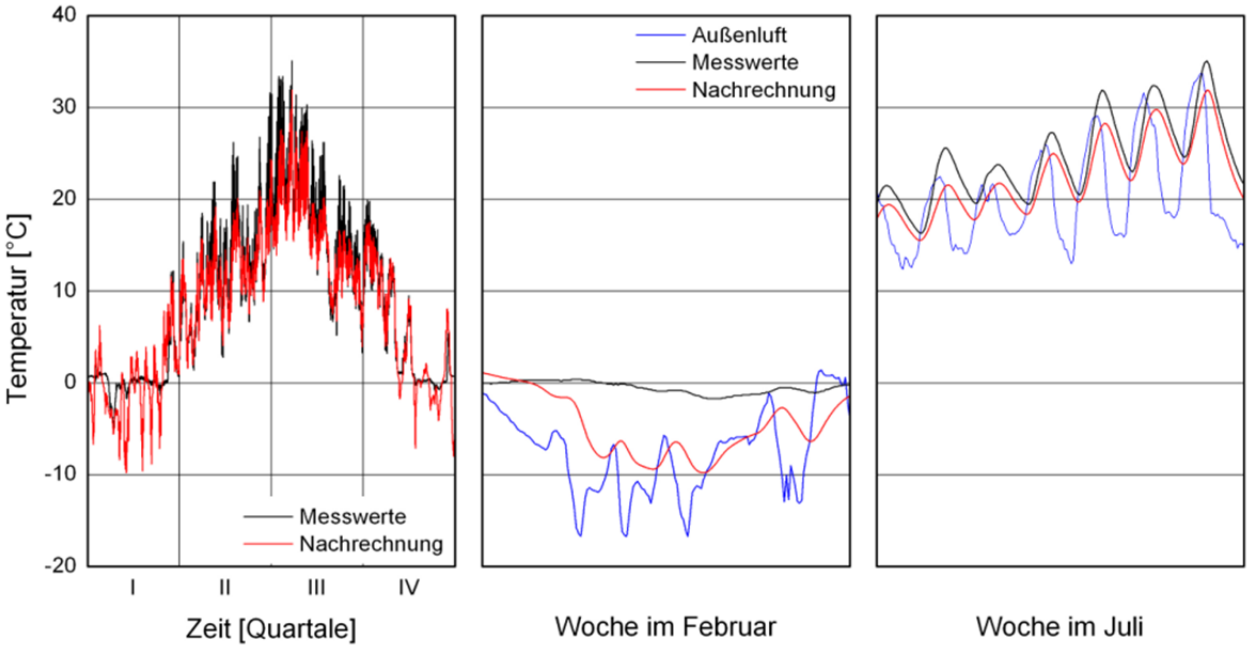


Bild 5:
Verlauf der gemessenen und berechneten Temperaturen unter der Kiesschicht von Dach 5 für das ganze Jahr (links) und für eine Woche im Winter (mitte) und eine Woche im Sommer (rechts) im Vergleich zur Außenlufttemperatur.

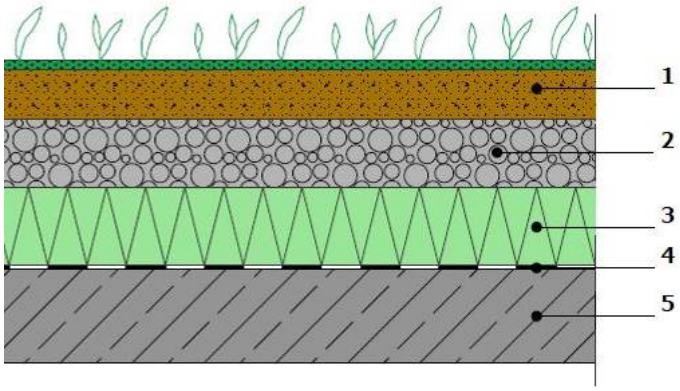


Bild 6:
Bauteilaufbau des Daches 1 am Standort Holzkirchen mit 80 mm Substrat (1), 50 mm Dränageschicht (2), 100 mm XPS-Dämmung (3), Dachbahn (4) und 120 mm Betondecke (5).

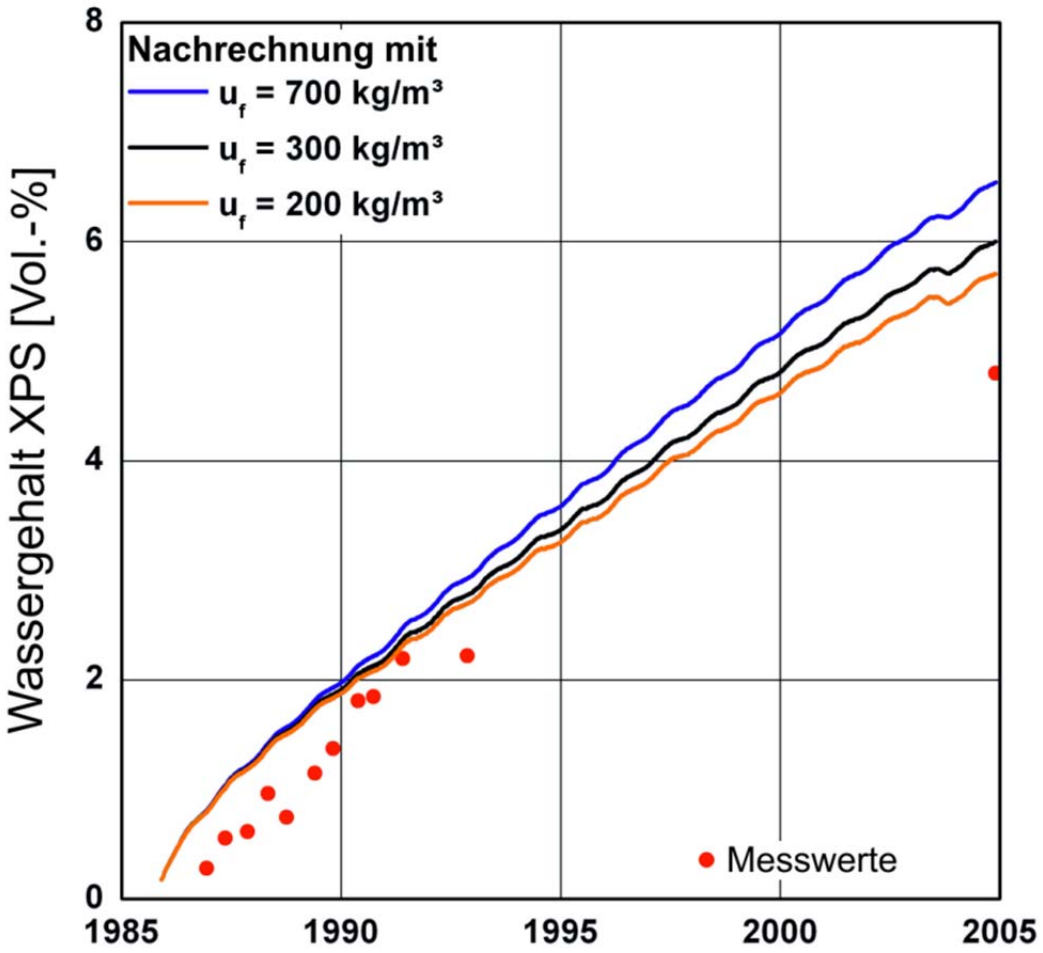


Bild 7:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der XPS-Dämmung im Dach 1 in Abhängigkeit von der freien Wassersättigung der Substratschicht im Vergleich zu den gemessenen Werten.

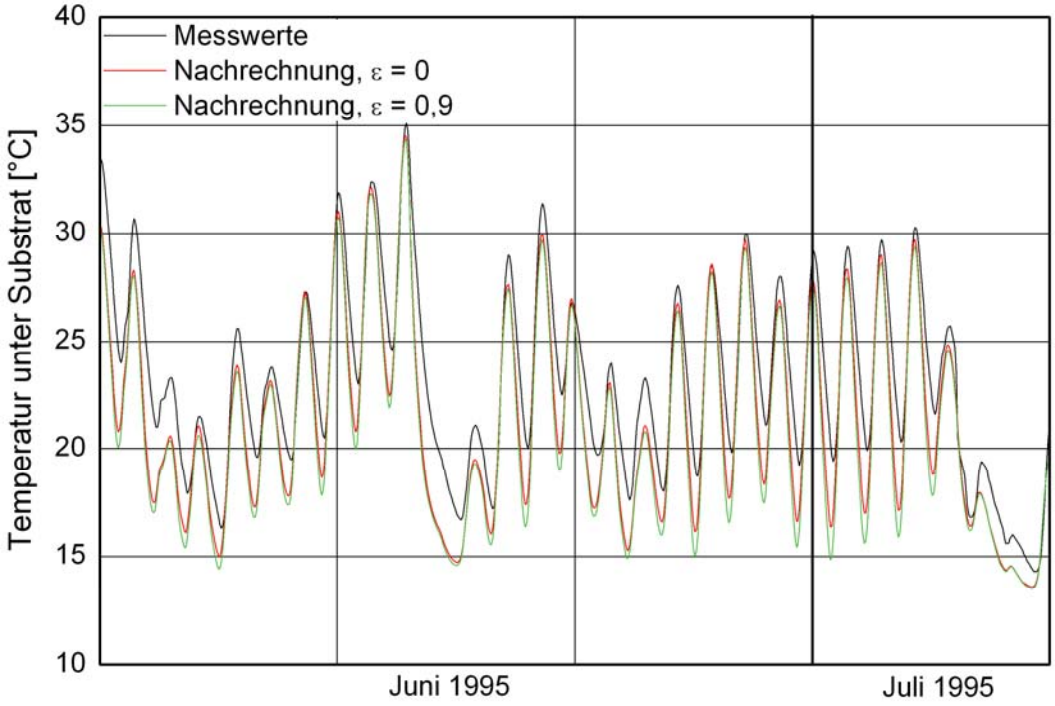


Bild 8:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Kiesschicht von Dach 5 am Standort Holzkirchen in Abhängigkeit von der langwelligen Strahlungsemission im Vergleich zu den gemessenen Werten für vier Wochen im Sommer.

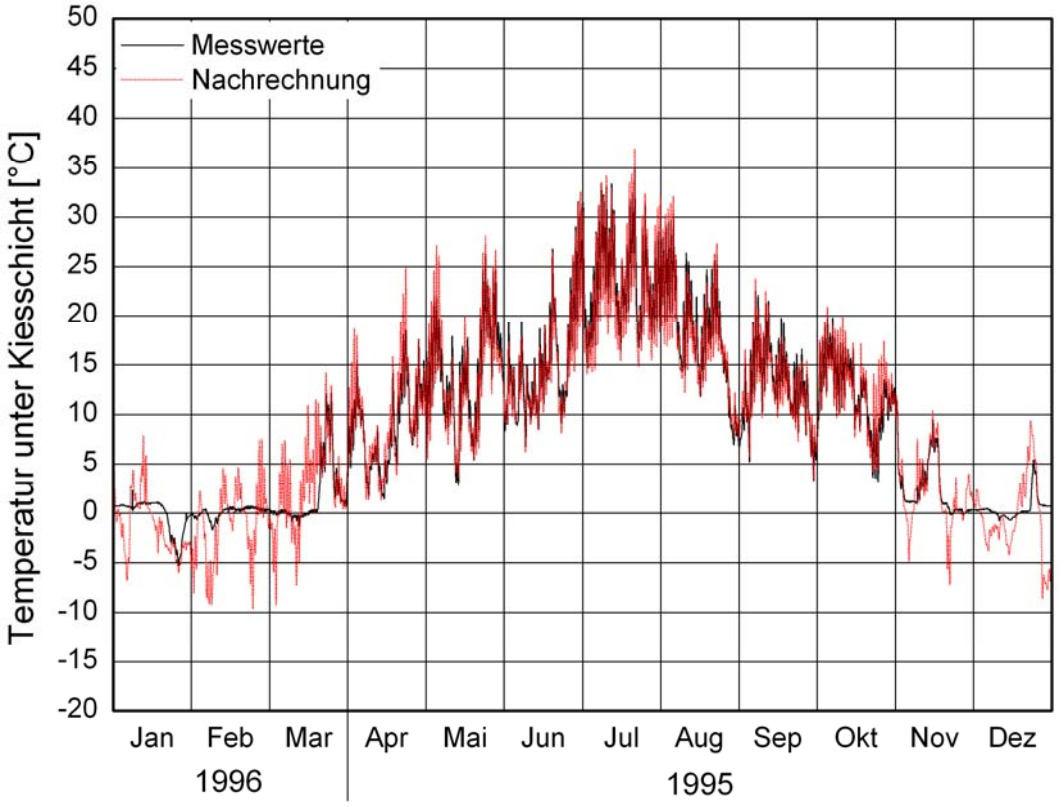


Bild 9:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Kiesschicht von Dach 5 am Standort Holzkirchen im Vergleich zu den gemessenen Werten für den kompletten Messzeitraum 1995 / 1996.

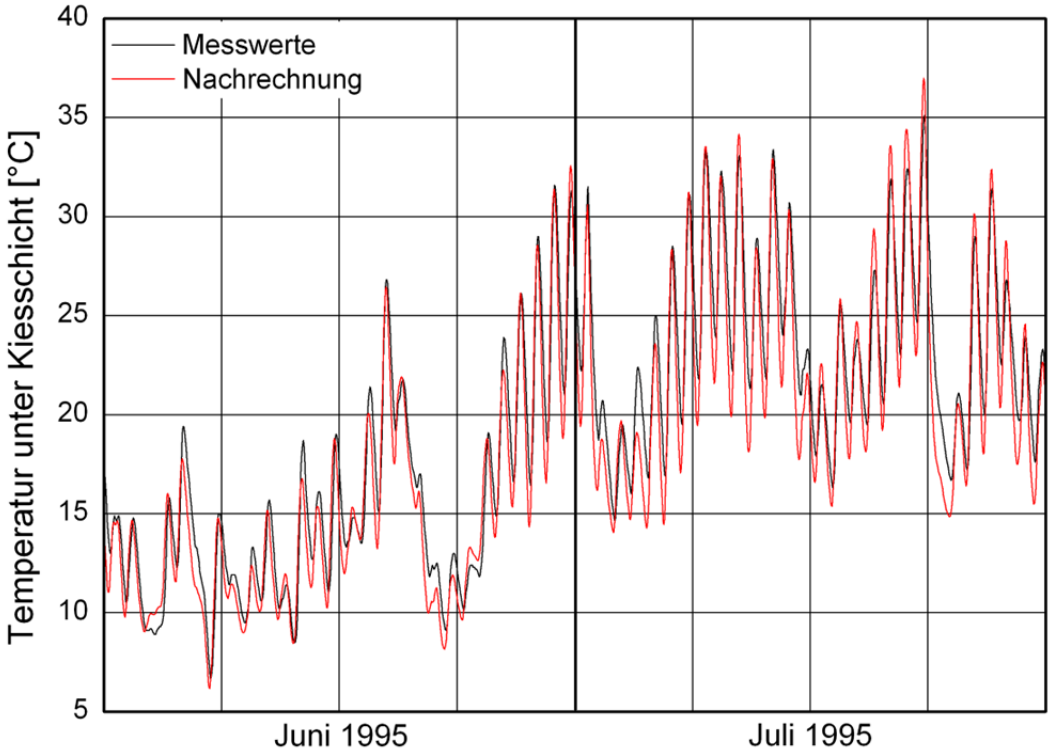


Bild 10:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Kiesschicht von Dach 5 am Standort Holzkirchen im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Monate Juni und Juli 1995.

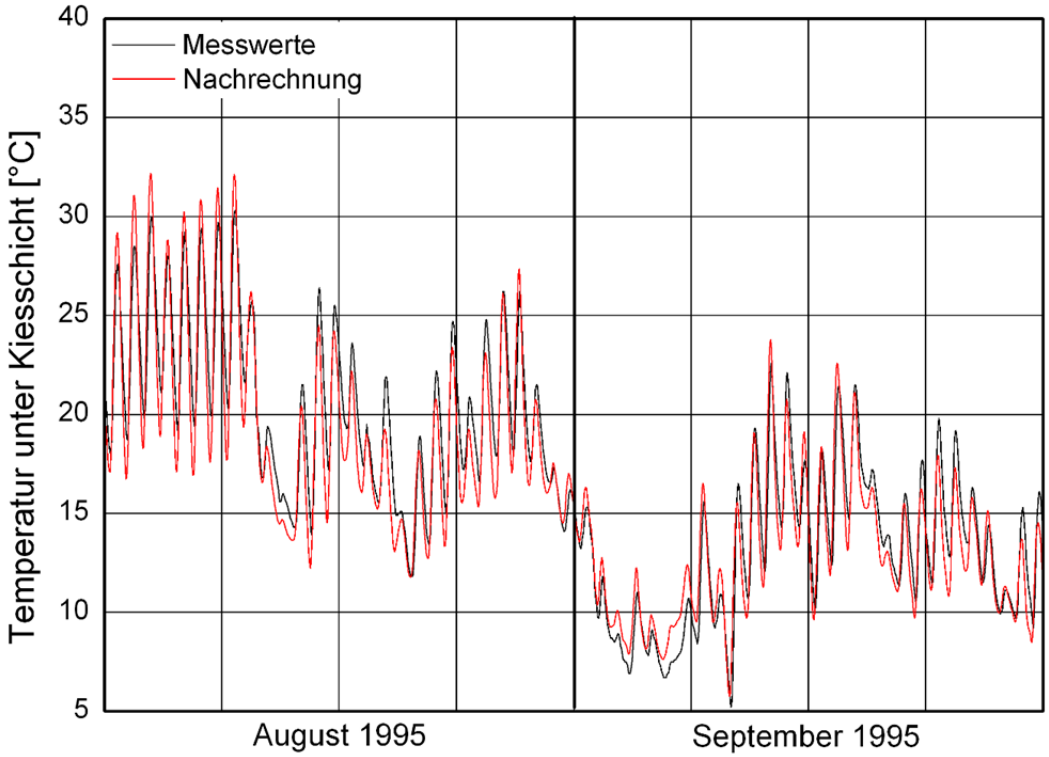


Bild 11:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Kiesschicht von Dach 5 am Standort Holzkirchen im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Monate August und September 1995.



Bild 12:
Versuchsstand auf dem Freilandversuchsgelände der MFPA Leipzig mit den verschiedenen, untersuchten Versuchsfeldern [2].

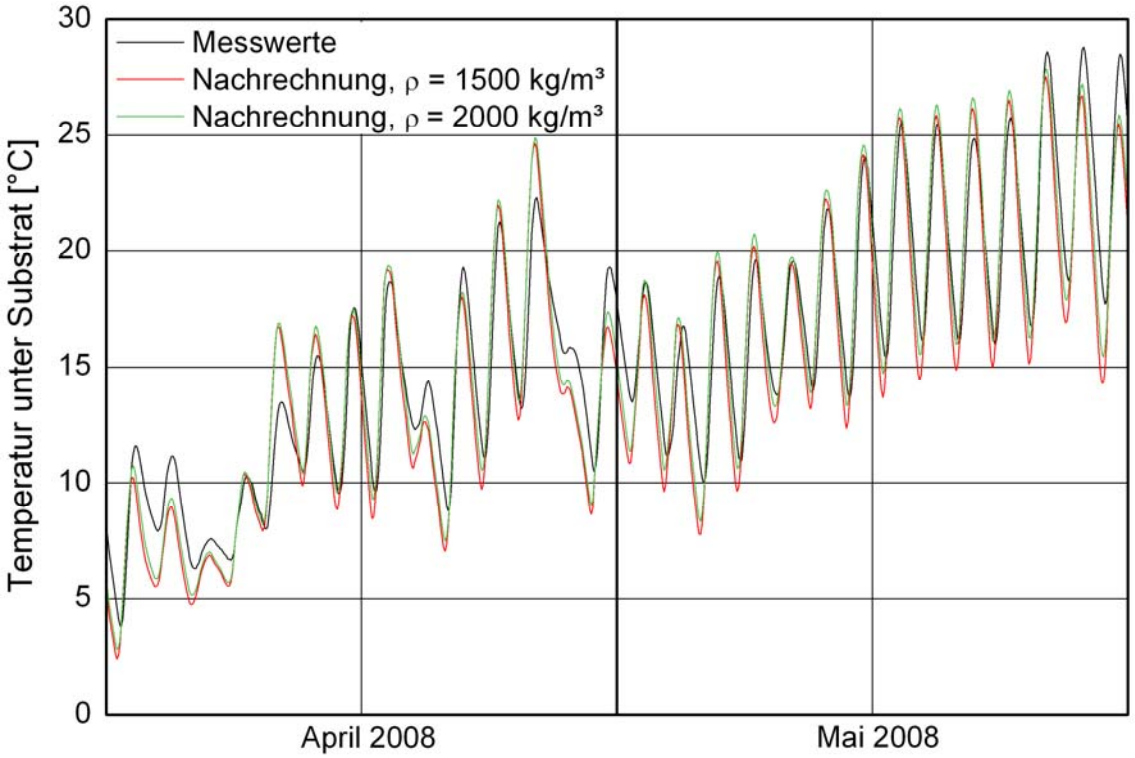


Bild 13:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Substratschicht des Versuchsfeldes 3.1 am Standort Leipzig in Abhängigkeit von der Rohdichte der Substratschicht im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Monate April und Mai 2008.

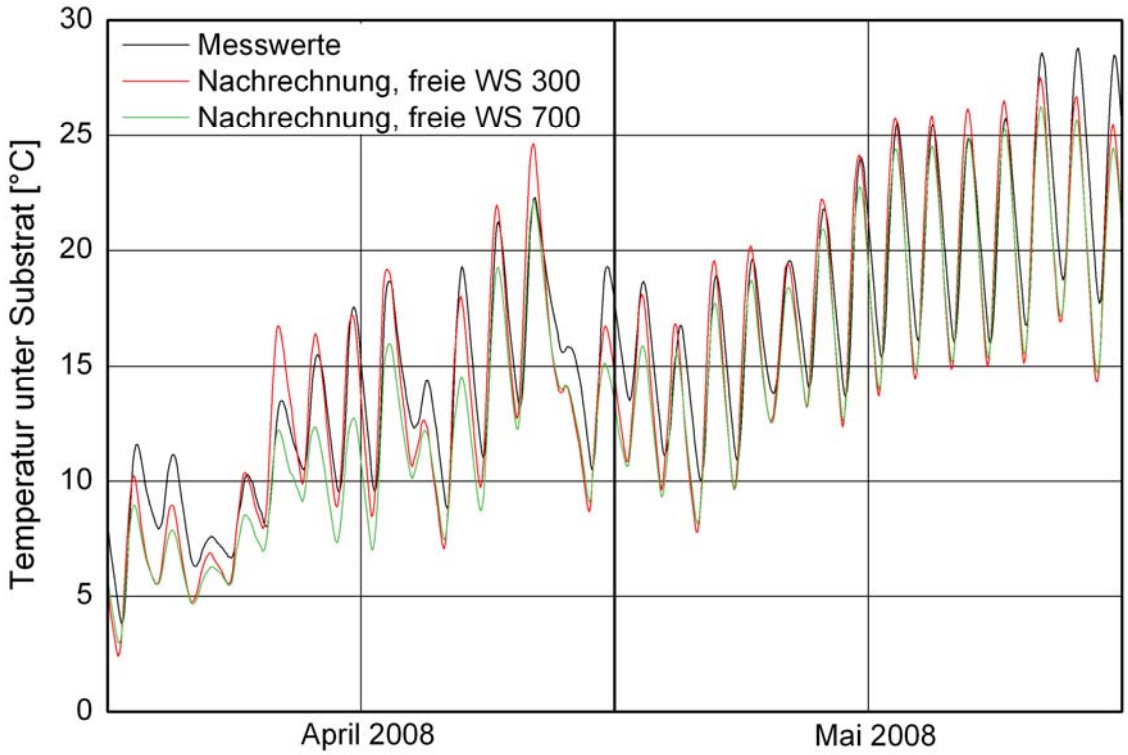


Bild 14:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Substratschicht des Versuchsfeldes 3.1 am Standort Leipzig in Abhängigkeit von der freien Wassersättigung der Substratschicht im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Monate April und Mai 2008.

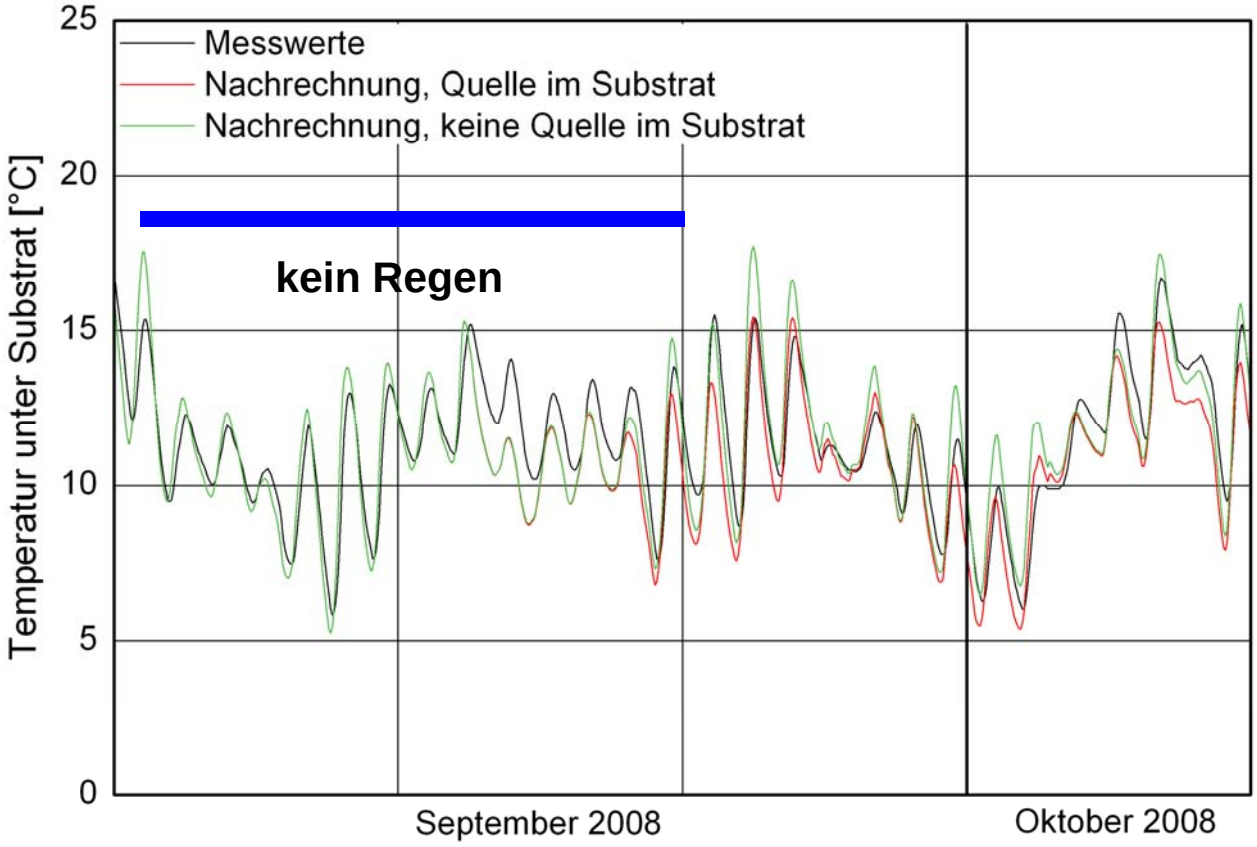


Bild 15:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Substratschicht des Versuchsfeldes 3.1 am Standort Leipzig in Abhängigkeit der Feuchtequelle in der Substratschicht im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Monate September und Oktober 2008.

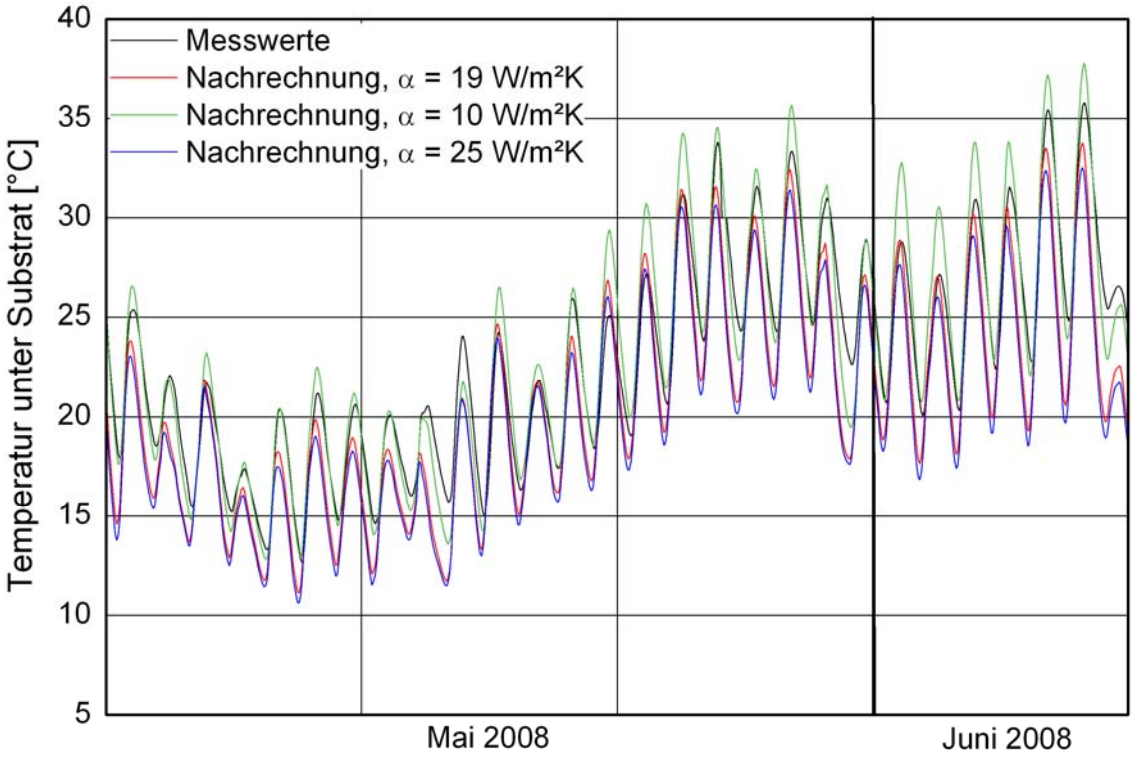


Bild 16:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Substratschicht des Versuchsfeldes 3.1 am Standort Leipzig in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Monate Mai und Juni 2008.

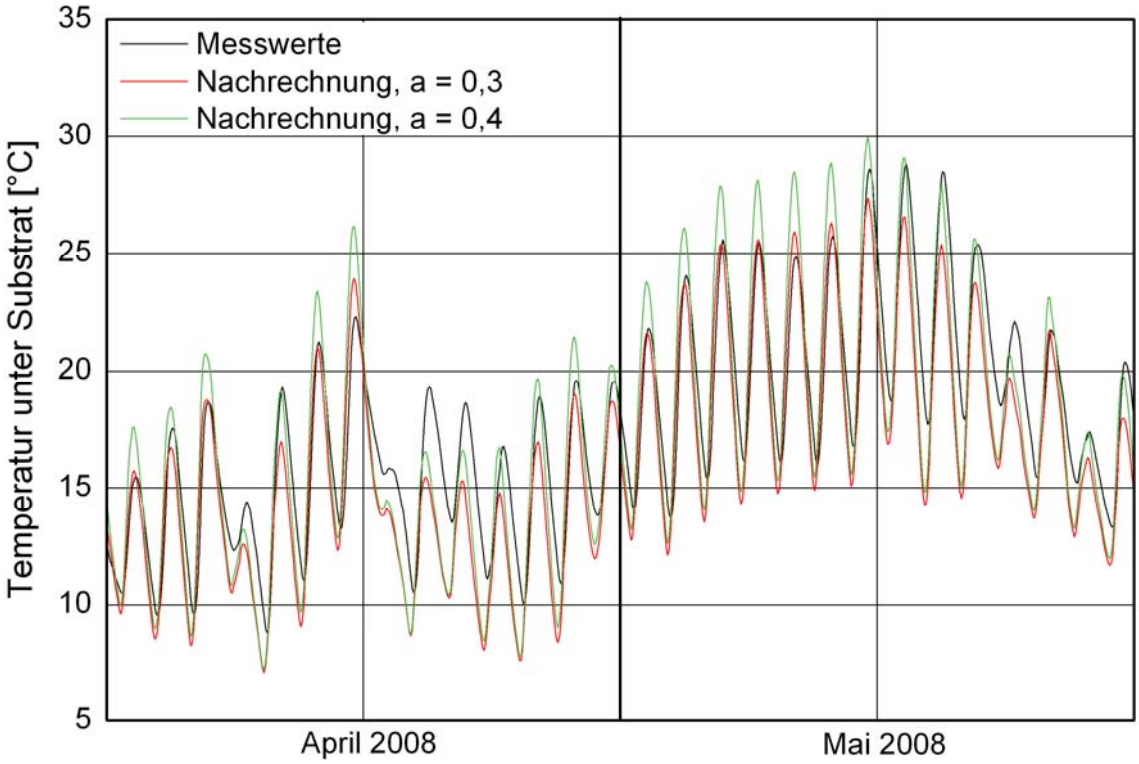


Bild 17:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Substratschicht des Versuchsfeldes 3.1 am Standort Leipzig in Abhängigkeit der kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Monate April und Mai 2008.

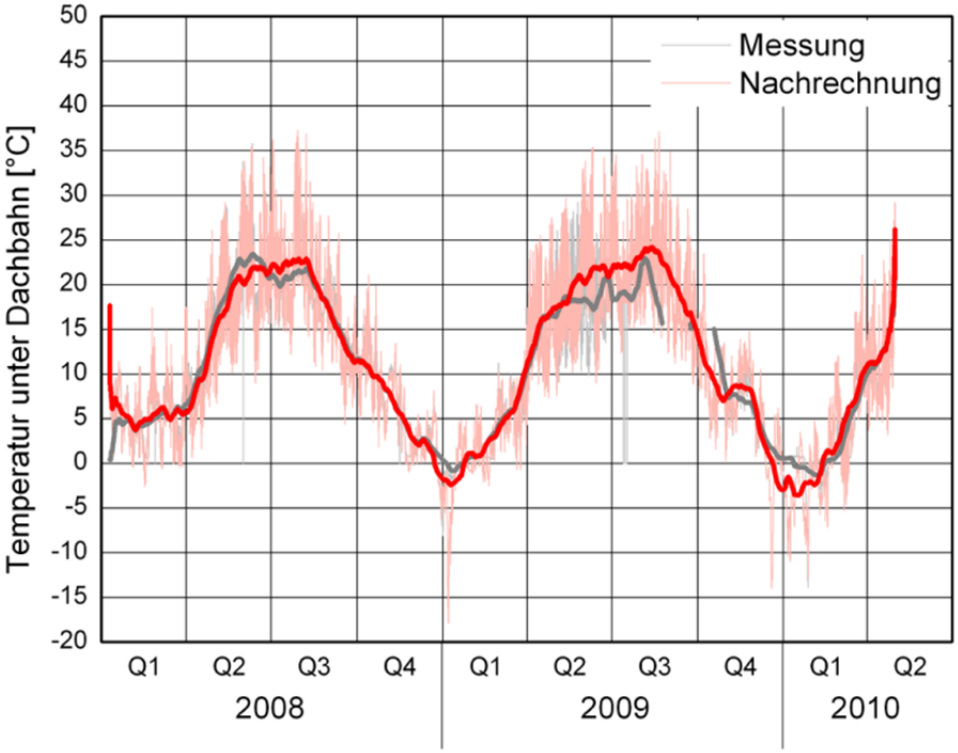


Bild 18:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der PVD-Dachabdichtung des Versuchsfeldes 3.1 am Standort Leipzig im Vergleich zu den gemessenen Werten für den Messzeitraum Januar 2008 bis April 2010. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven jeweils das gleitende Monatsmittel.

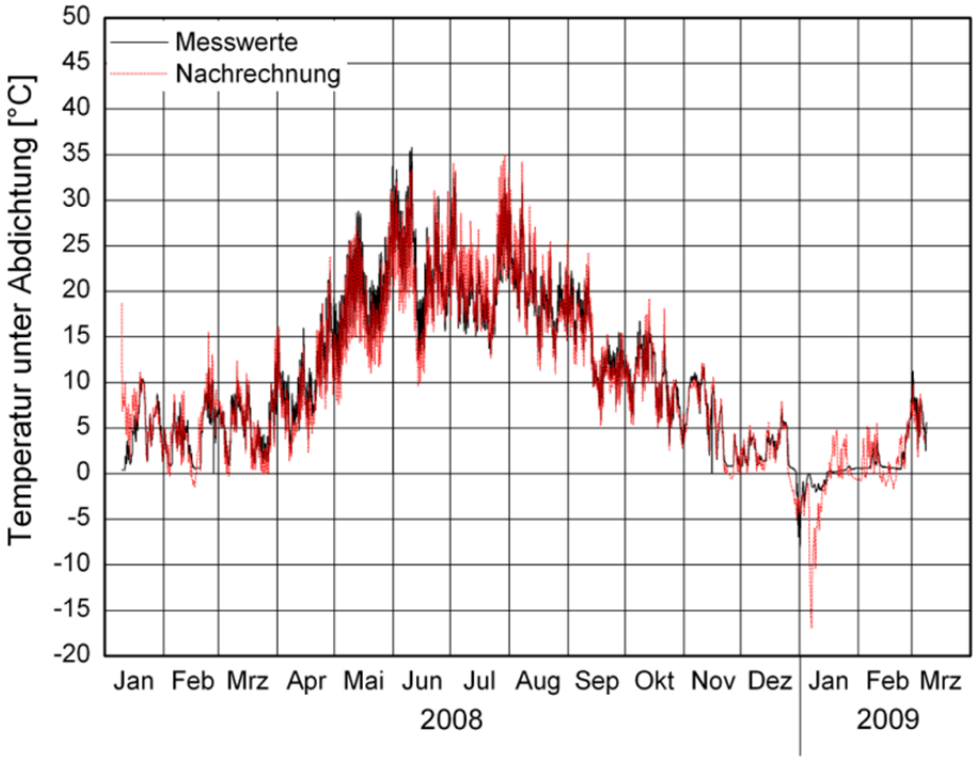


Bild 19:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der PVC-Abdichtungsbahn des Versuchsfeldes 3.1 am Standort Leipzig im Vergleich zu den gemessenen Werten für den Messzeitraum Januar 2008 bis März 2009.

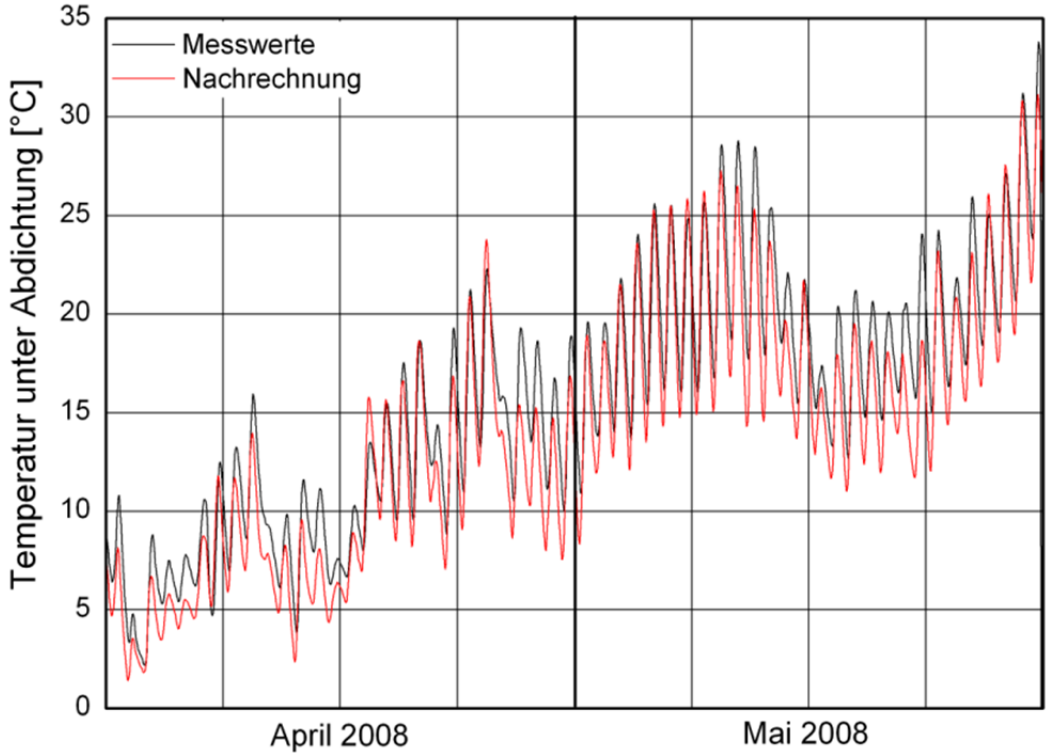


Bild 20:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der PVC-Abdichtungsbahn des Versuchsfeldes 3.1 am Standort Leipzig im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Monate April und Mai 2008.

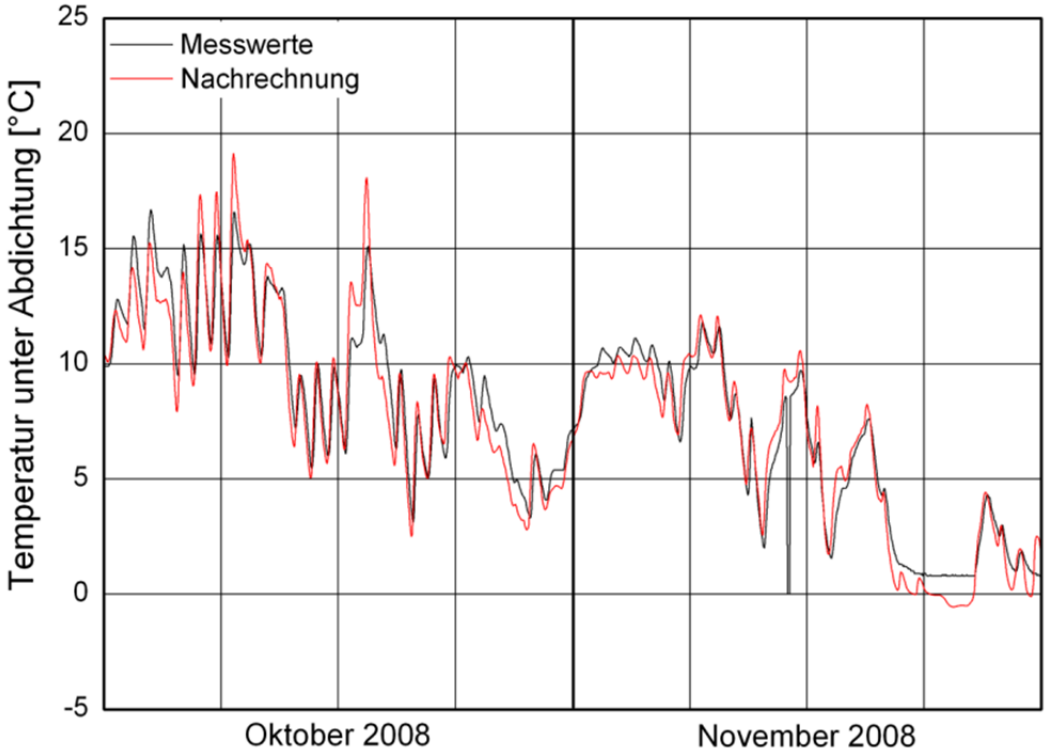


Bild 21:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der PVC-Abdichtungsbahn des Versuchsfeldes 3.1 am Standort Leipzig im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Monate Oktober und November 2008.

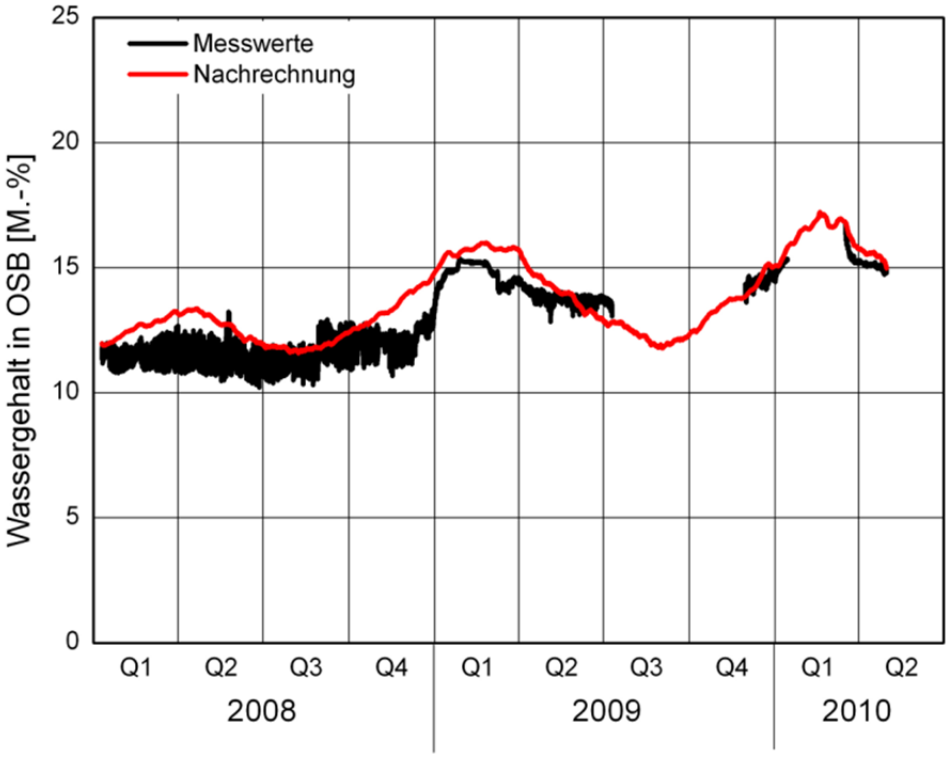


Bild 22:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts der oberseitigen Beplankung des Versuchsfeldes 3.1 am Standort Leipzig im Vergleich zu den gemessenen Werten für den Messzeitraum von Januar 2008 bis April 2010.



Bild 23:
Fotographische Ansicht des Gründach-Versuchsfeldes der Holzforschung Austria [40].

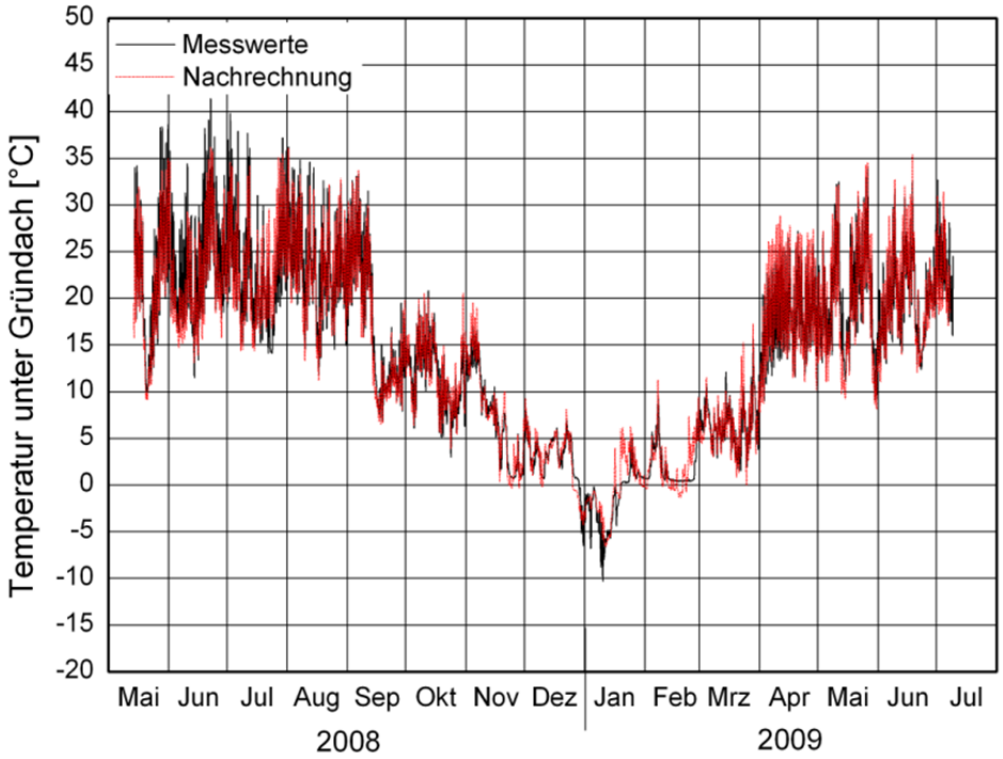


Bild 24:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Gründachschicht des Versuchsfeldes am Standort Wien im Vergleich zu den gemessenen Werten für den Messzeitraum Mai 2008 bis Juli 2009.

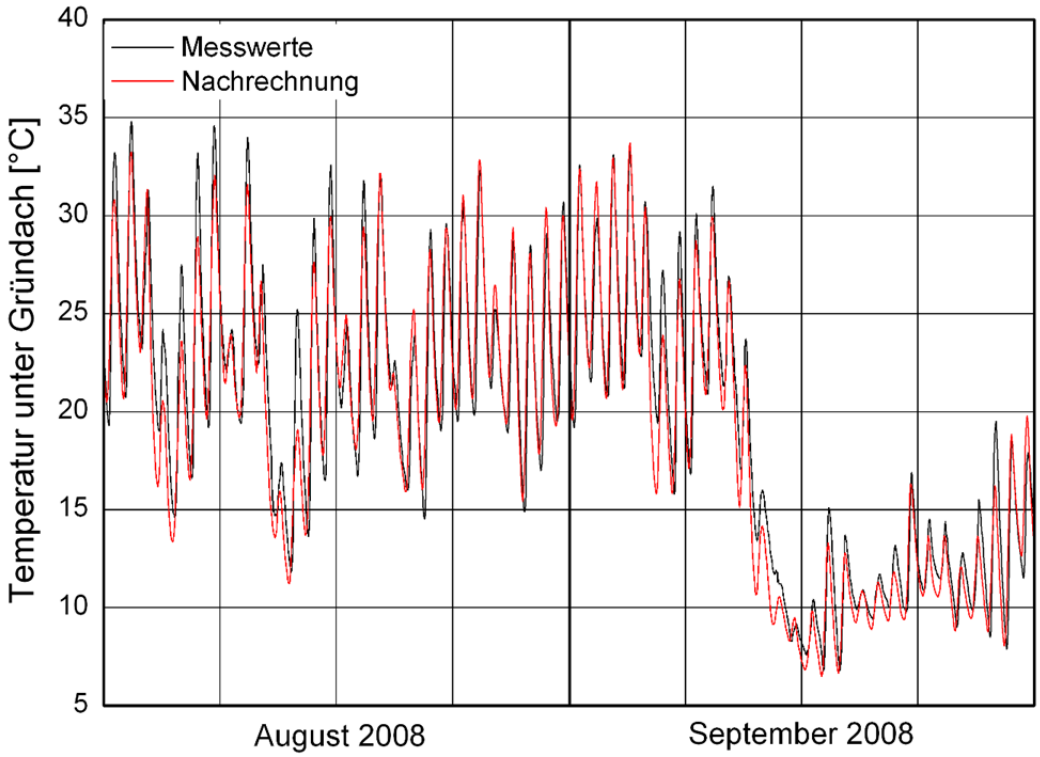


Bild 25:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Gründachschicht des Versuchsfeldes am Standort Wien im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Monate August und September 2008.

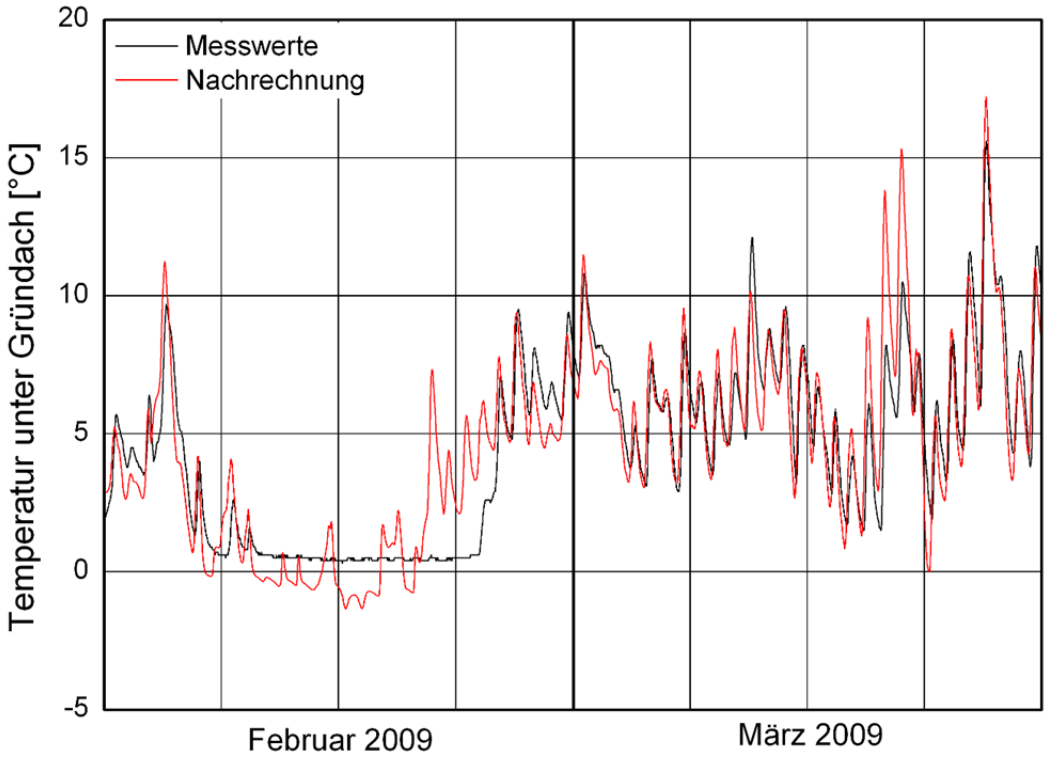


Bild 26:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Gründachschicht des Versuchsfeldes am Standort Wien im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Monate Februar und März 2009.



Bild 27:
Fotographische Ansicht eines von fünf Gründach-Versuchsfelder auf dem Dach des Zentrums für Umweltbewusstes Bauen in Kassel [1].

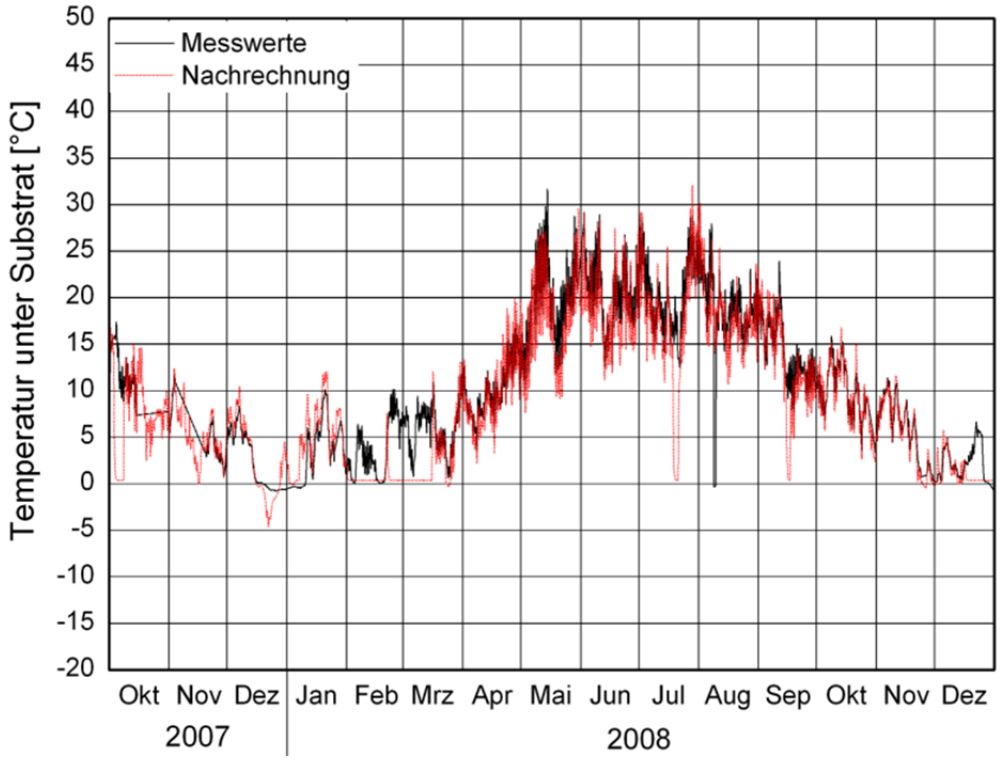


Bild 28:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Substratschicht des Gründach-versuchsfeldes „Feld II“ am Standort Kassel im Vergleich zu den gemessenen Werten für den Messzeitraum Oktober 2007 bis Dezember 2008.

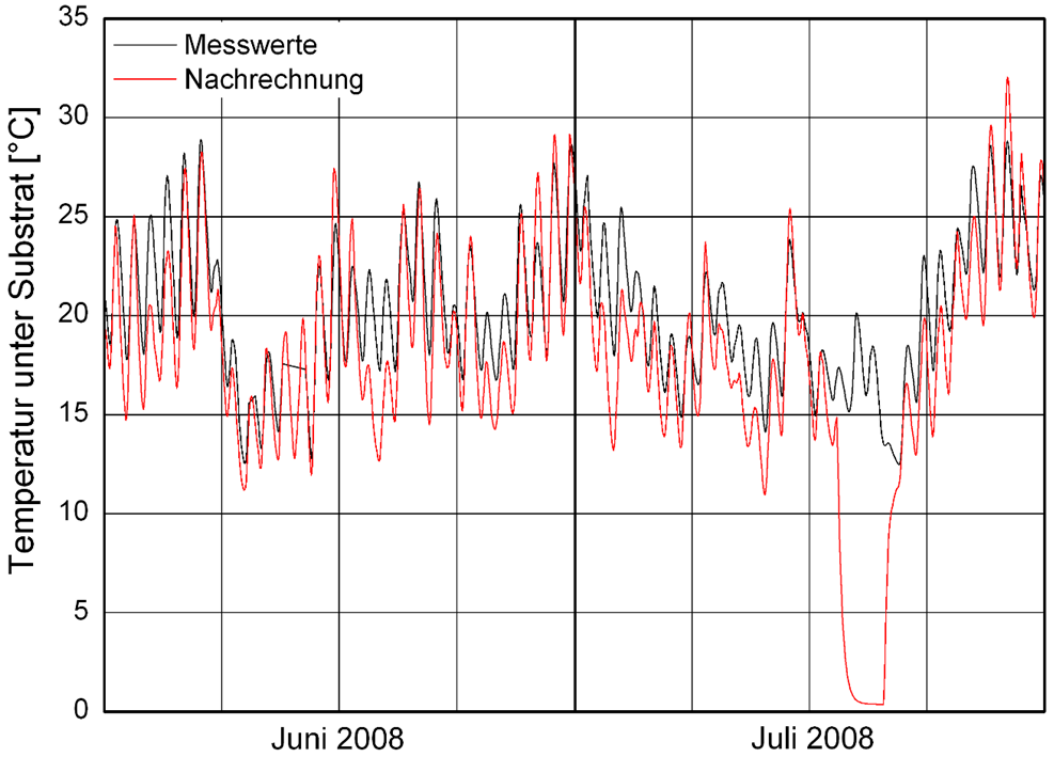


Bild 29:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Substratschicht des Gründach-versuchsfeldes „Feld II“ am Standort Kassel im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Monate Juni und Juli 2008.

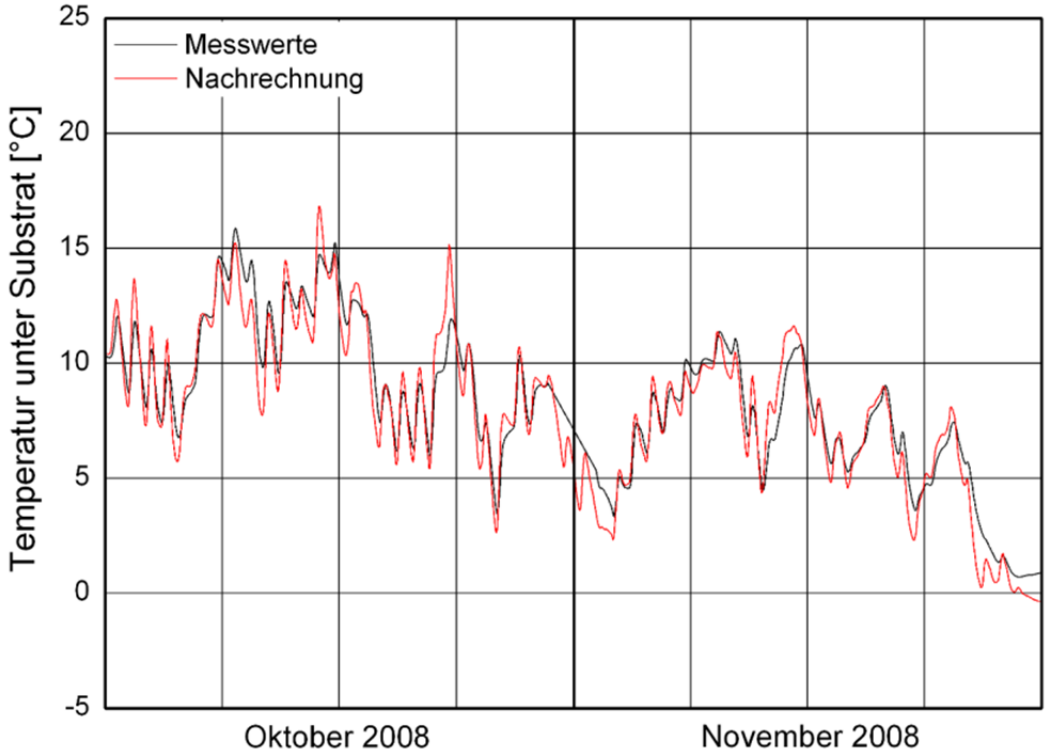


Bild 30:
Berechneter Verlauf der Temperatur unter der Substratschicht des Gründach-versuchsfeldes „Feld II“ am Standort Kassel im Vergleich zu den gemessenen Werten für die Monate Oktober und November 2008.

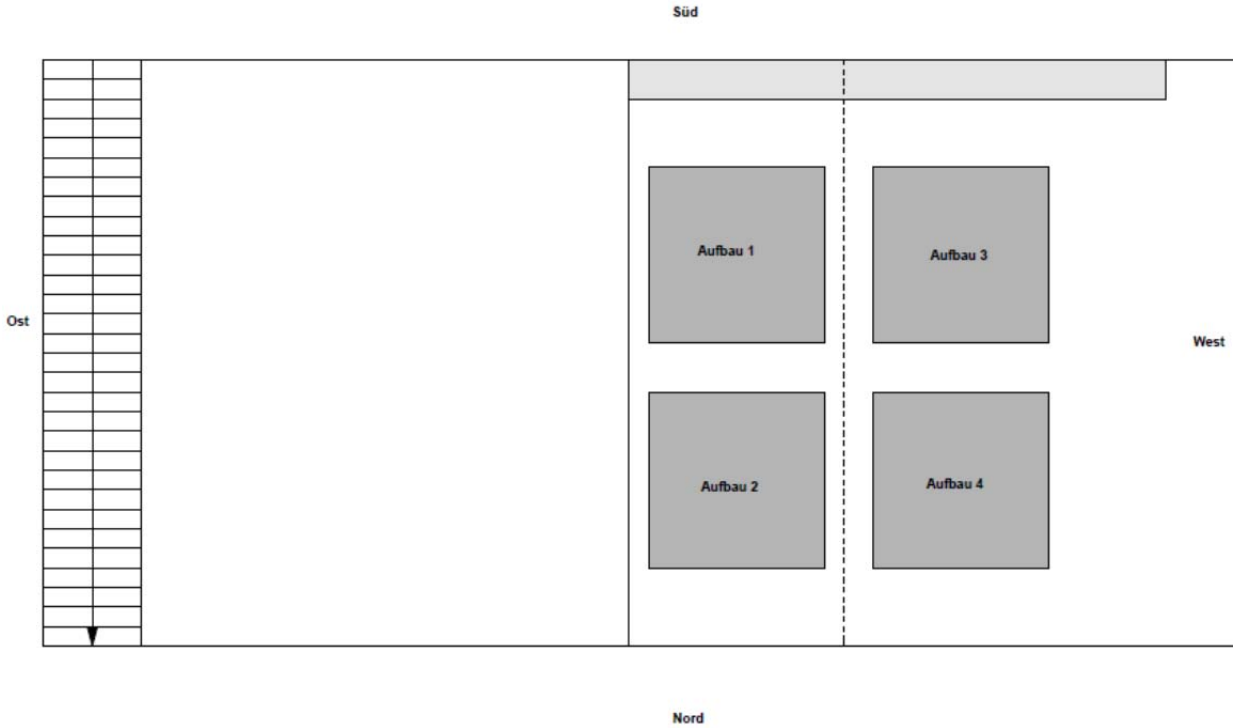


Bild 31:
Schematische Darstellung der Versuchsfelder auf dem Versuchsdach in Holzkirchen.

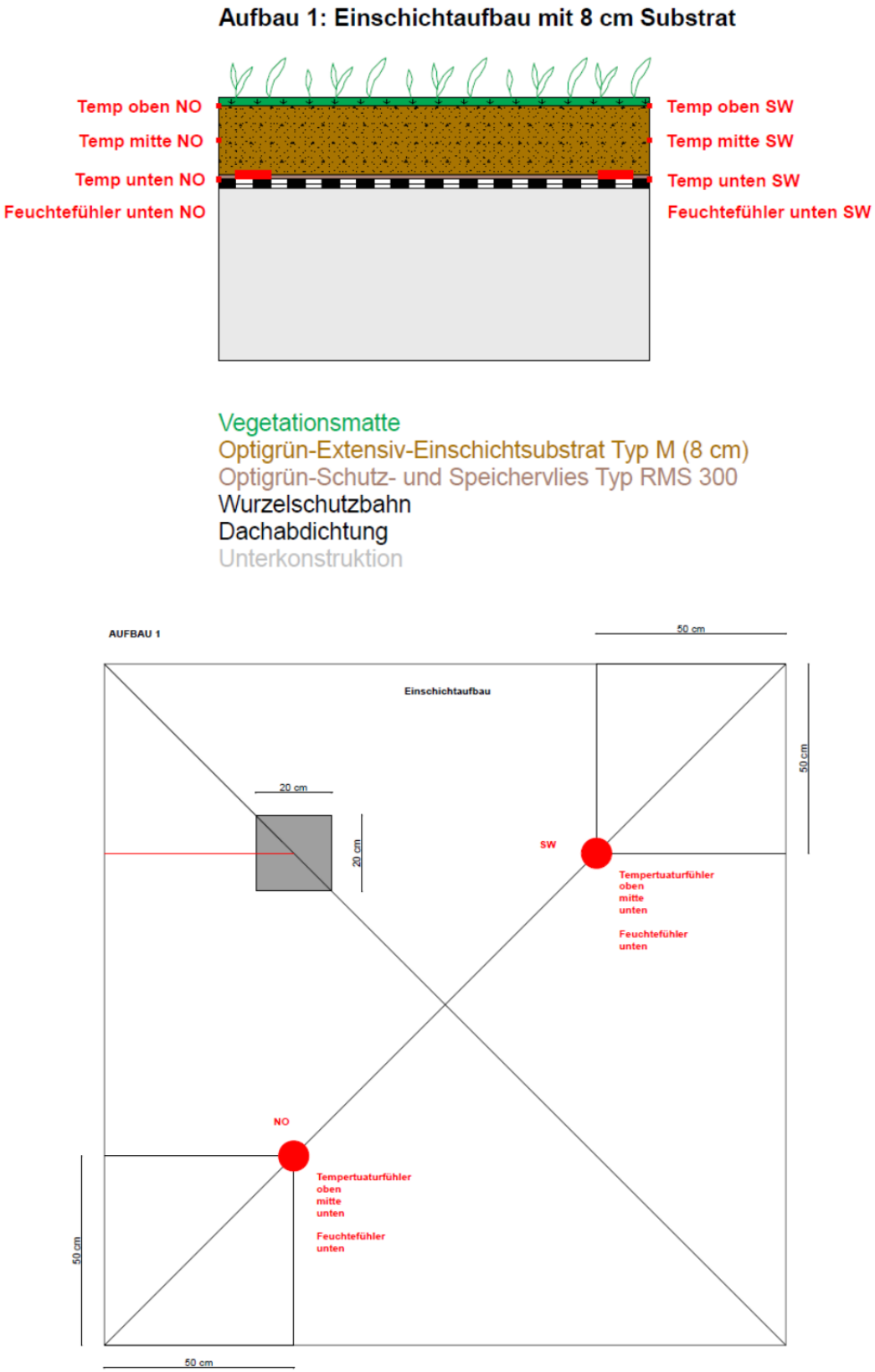


Bild 32:
Schematische Darstellung des Konstruktionsaufbaus sowie der Anordnung der Messstellen von Dachaufbau 1 (oben: Querschnitt; unten: Draufsicht)

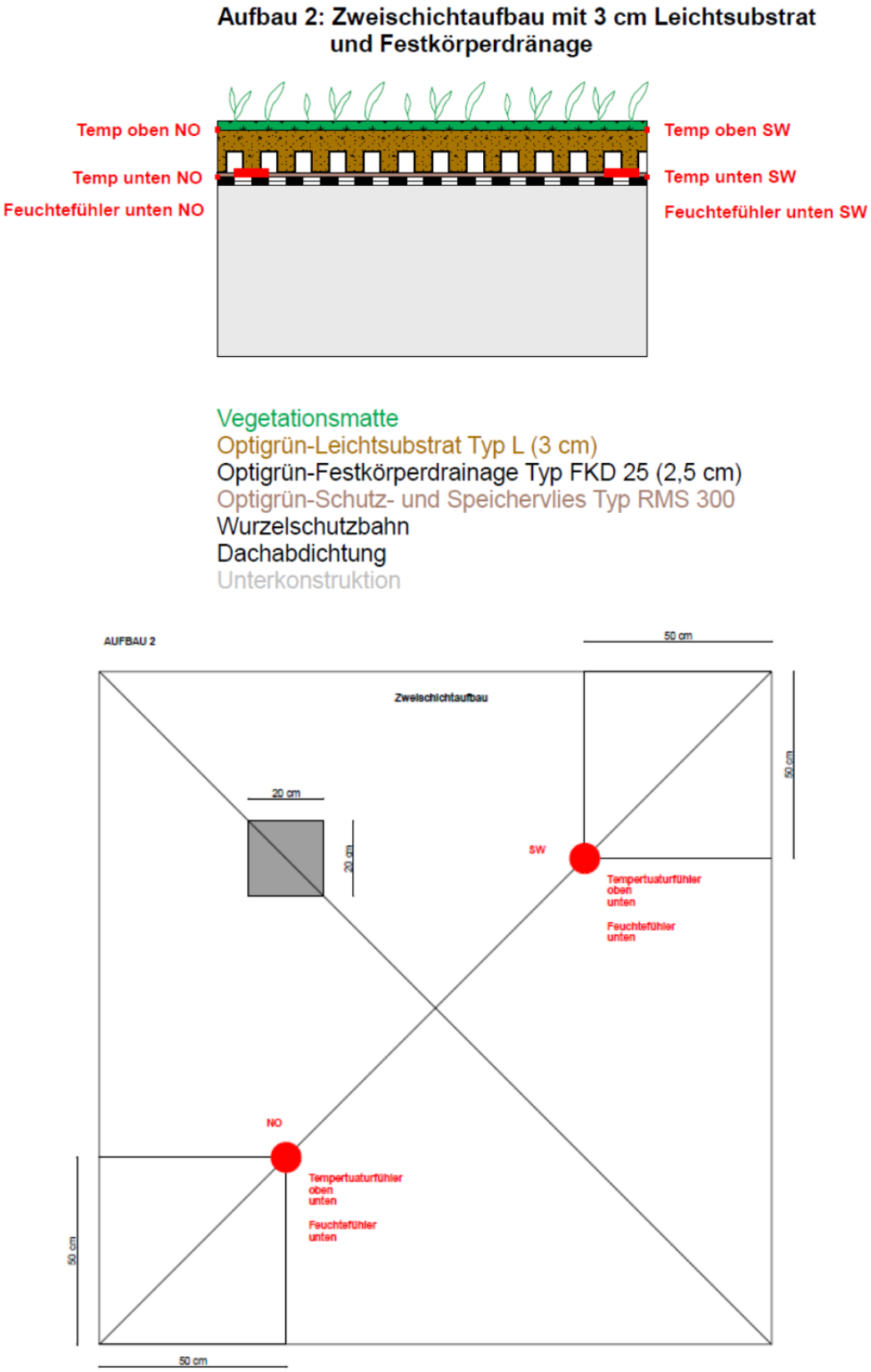


Bild 33:
Schematische Darstellung des Konstruktionsaufbaus sowie der Anordnung der Messstellen von Dachaufbau 2 (oben: Querschnitt; unten: Draufsicht)

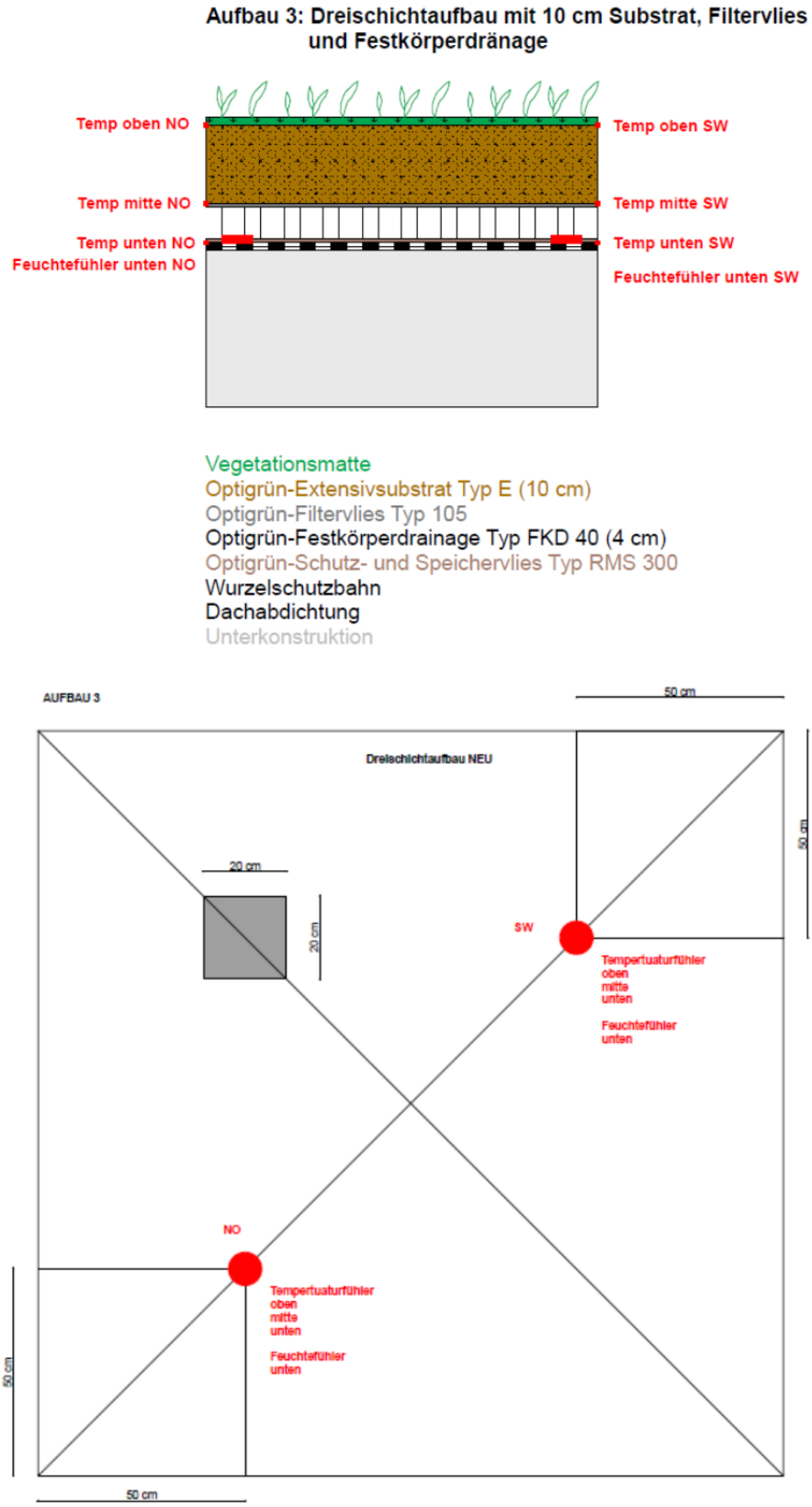


Bild 34:
Schematische Darstellung des Konstruktionsaufbaus sowie der Anordnung der Messstellen von Dachaufbau 3 (oben: Querschnitt; unten: Draufsicht)

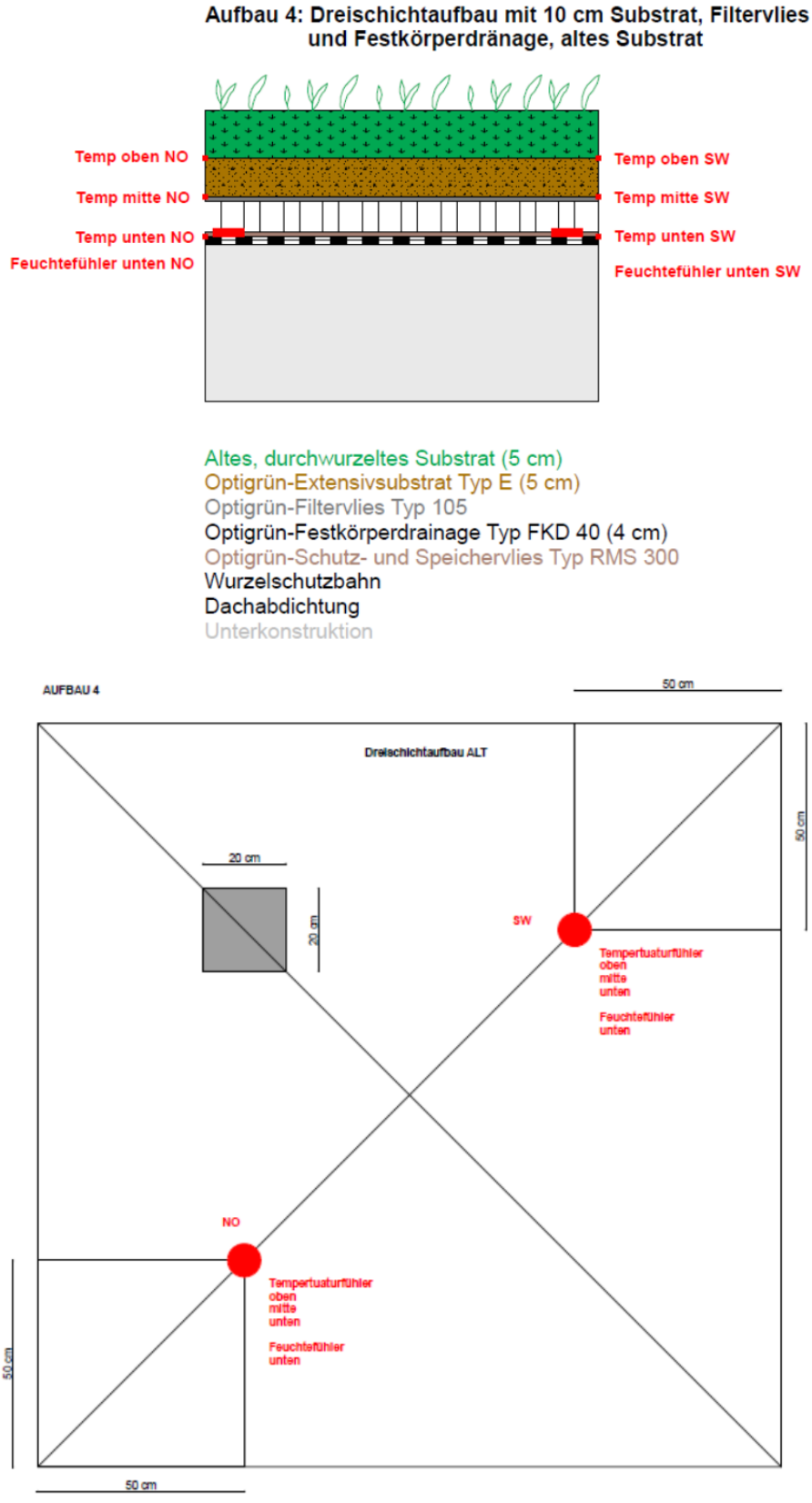


Bild 35:
Schematische Darstellung des Konstruktionsaufbaus sowie der Anordnung der Messstellen von Dachaufbau 4 (oben: Querschnitt; unten: Draufsicht)

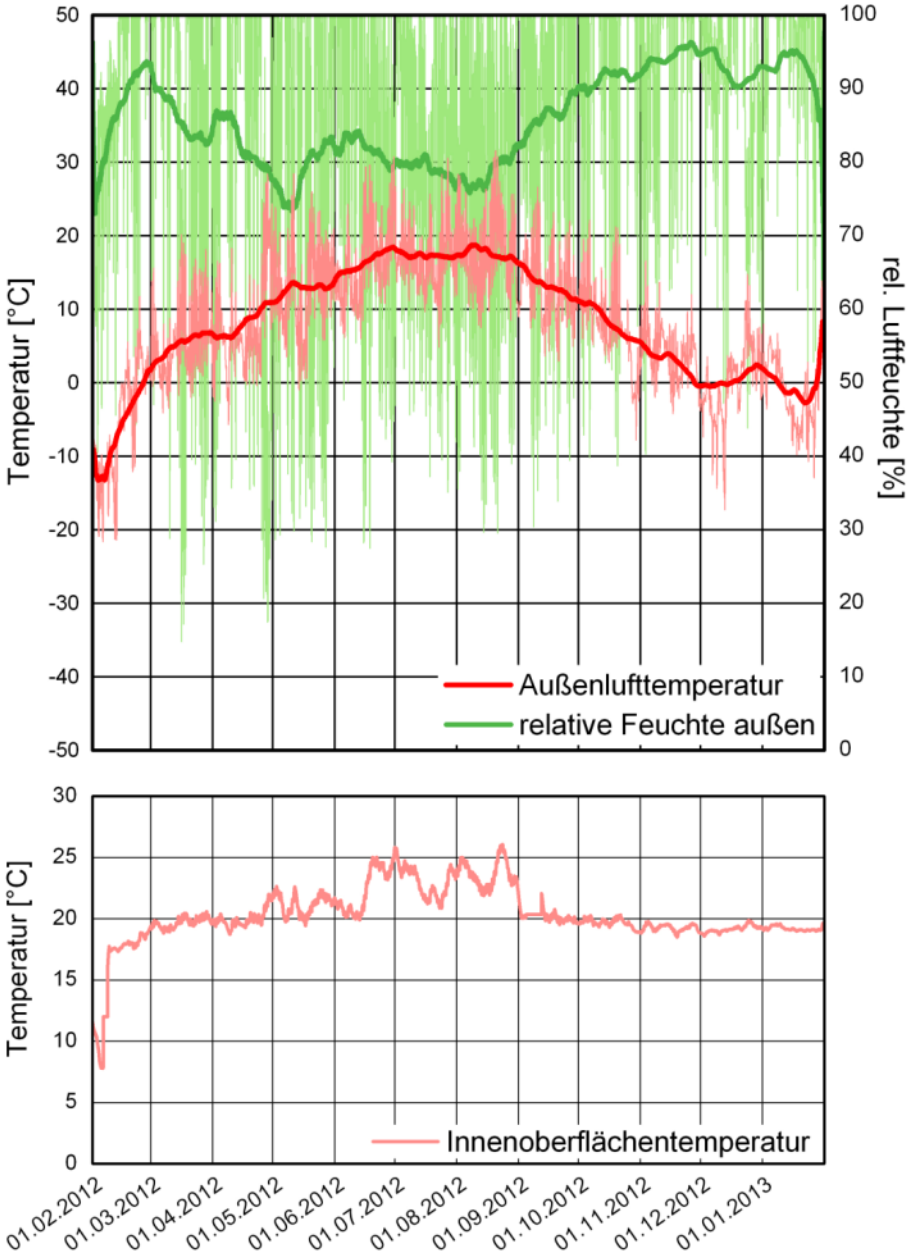


Bild 36:
Verlauf der am Standort Holzkirchen über den Versuchszeitraum vom 1. Februar 2012 bis 1. Februar 2013 gemessenen Außenlufttemperatur, relativen Luftfeuchte außen sowie der Innenoberflächentemperatur. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

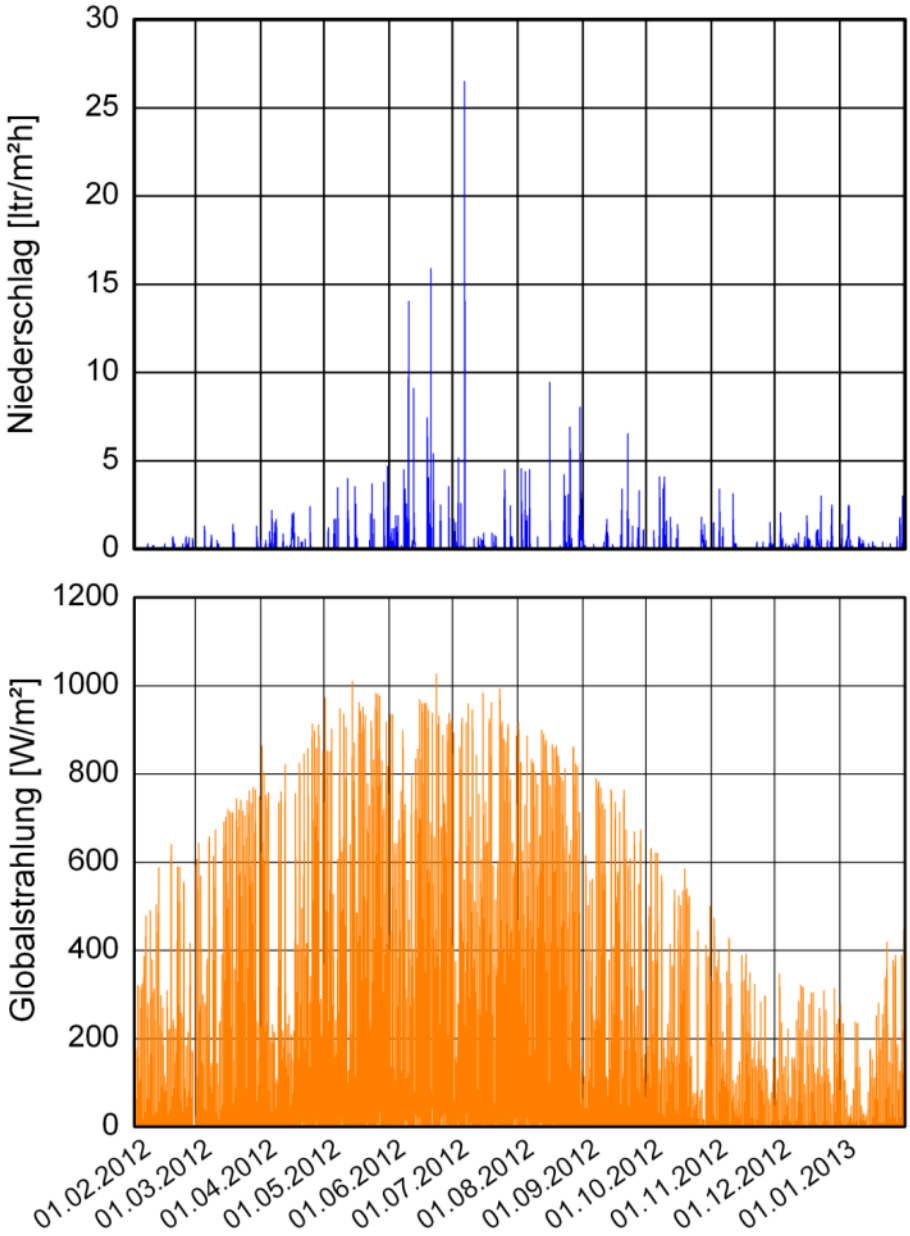


Bild 37:
Verlauf des stündlich gemessenen Niederschlags sowie der Globalstrahlung am Standort Holzkirchen über den Versuchszeitraum vom 1. Februar 2012 bis 1. Februar 2013.

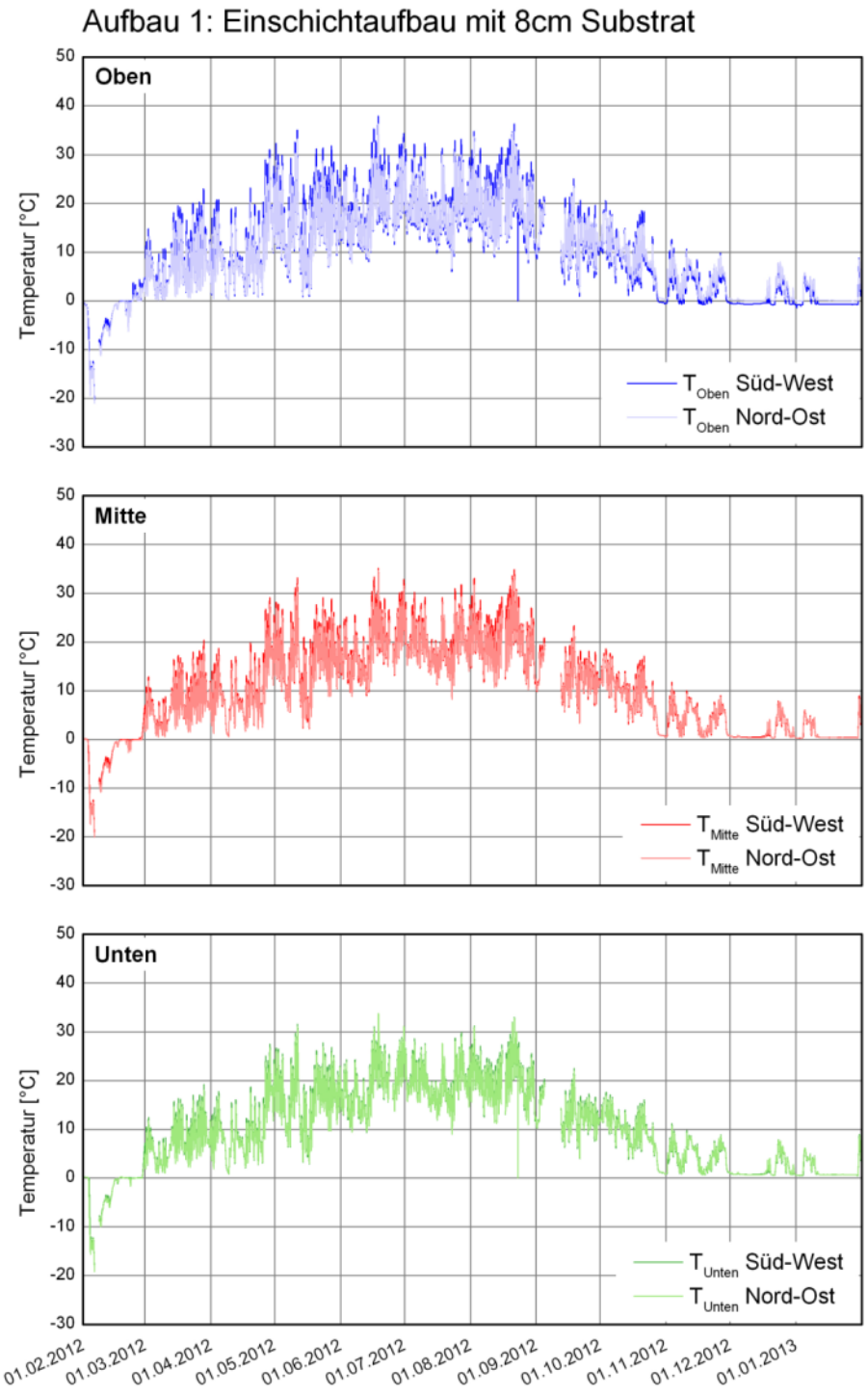


Bild 38:
Verlauf der stündlich gemessenen Temperaturen im Dachaufbau 1 am Standort Holzkirchen über den Versuchszeitraum vom 01. Februar 2012 bis 01. Februar 2013. Die Messung erfolgte in drei unterschiedlichen Höhen im Substrat (oben, Mitte, unten) sowie jeweils an zwei Positionen (Nord-Ost, Süd-West).

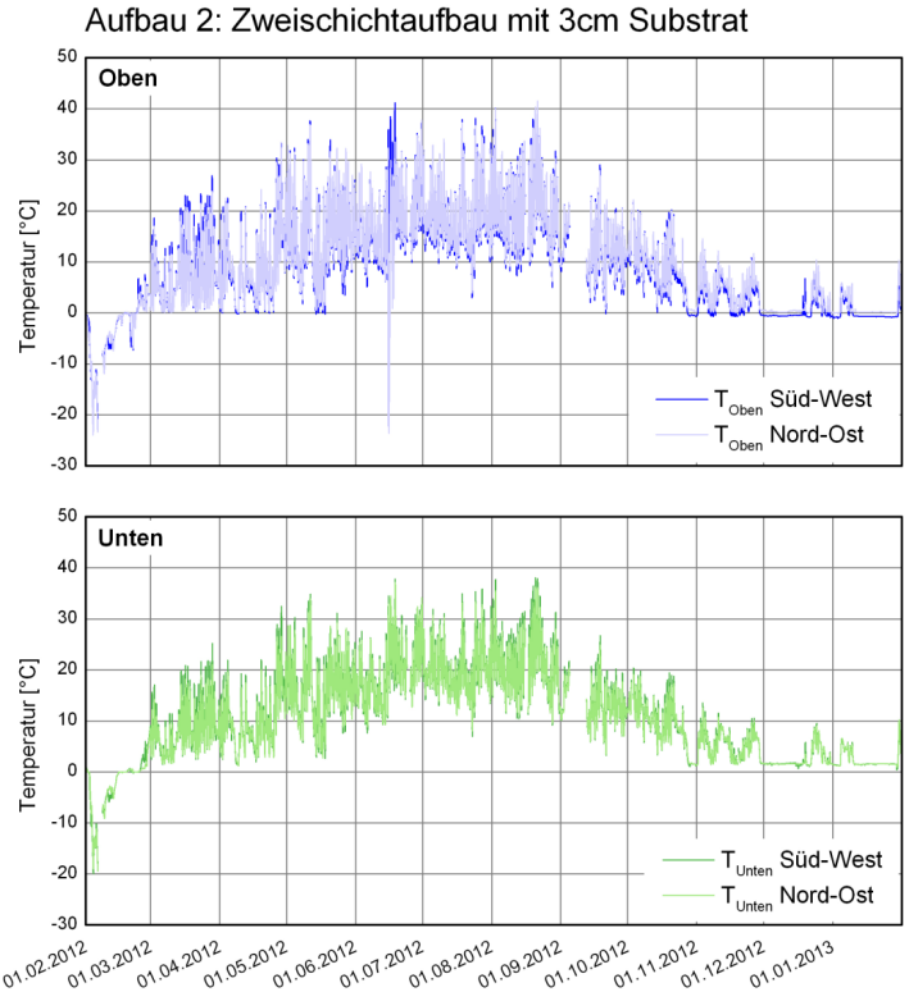


Bild 39:
Verlauf der stündlich gemessenen Temperaturen im Dachaufbau 2 am Standort Holzkirchen über den Versuchszeitraum vom 01. Februar 2012 bis 01. Februar 2013. Die Messung erfolgte in zwei unterschiedlichen Höhen im Substrat (oben, unten) sowie jeweils an zwei Positionen (Nord-Ost, Süd-West).

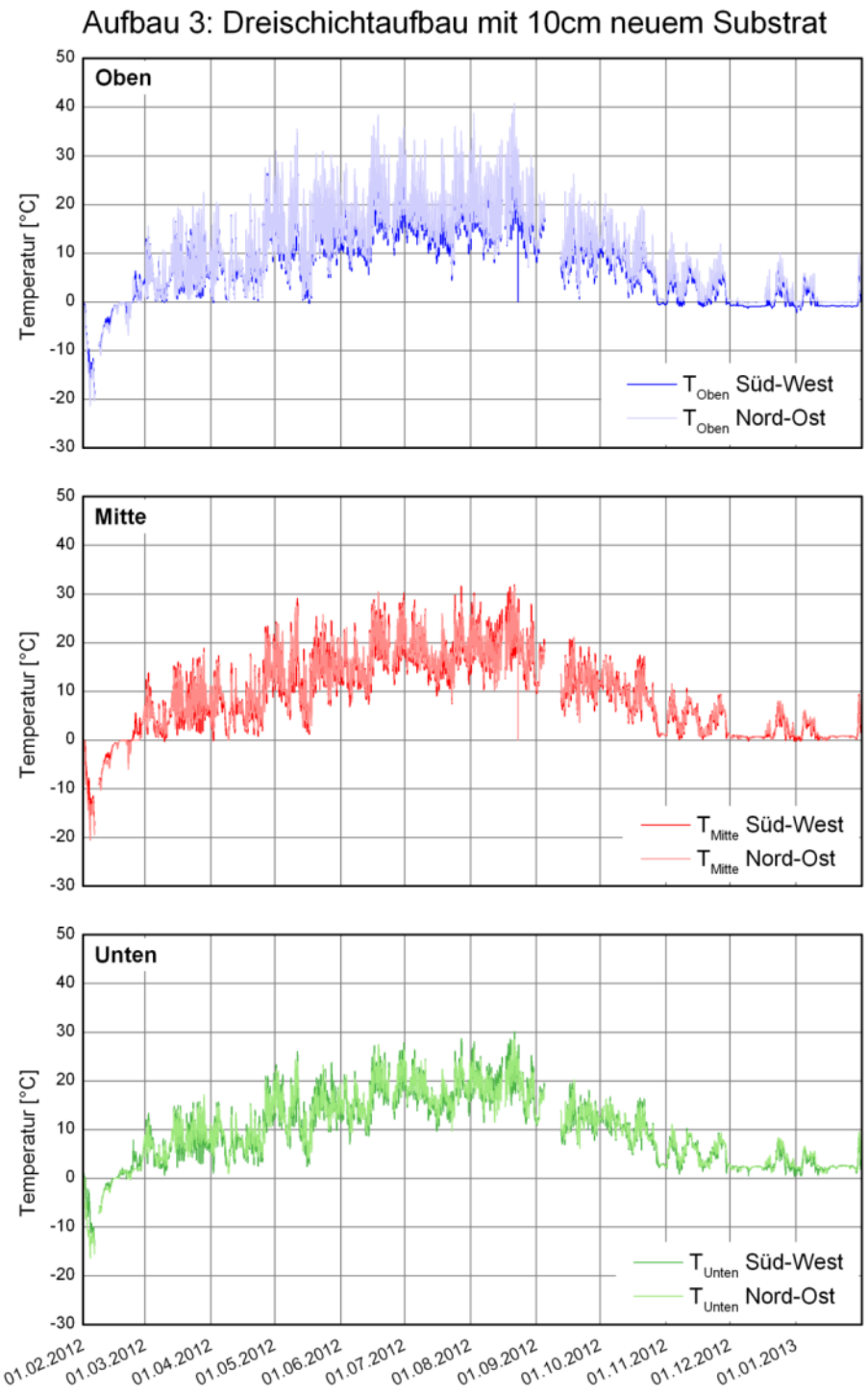


Bild 40:
Verlauf der stündlich gemessenen Temperaturen im Dachaufbau 3 am Standort Holzkirchen über den Versuchszeitraum vom 01. Februar 2012 bis 01. Februar 2013. Die Messung erfolgte in drei unterschiedlichen Höhen im Substrat (oben, Mitte, unten) sowie jeweils an zwei Positionen (Nord-Ost, Süd-West).

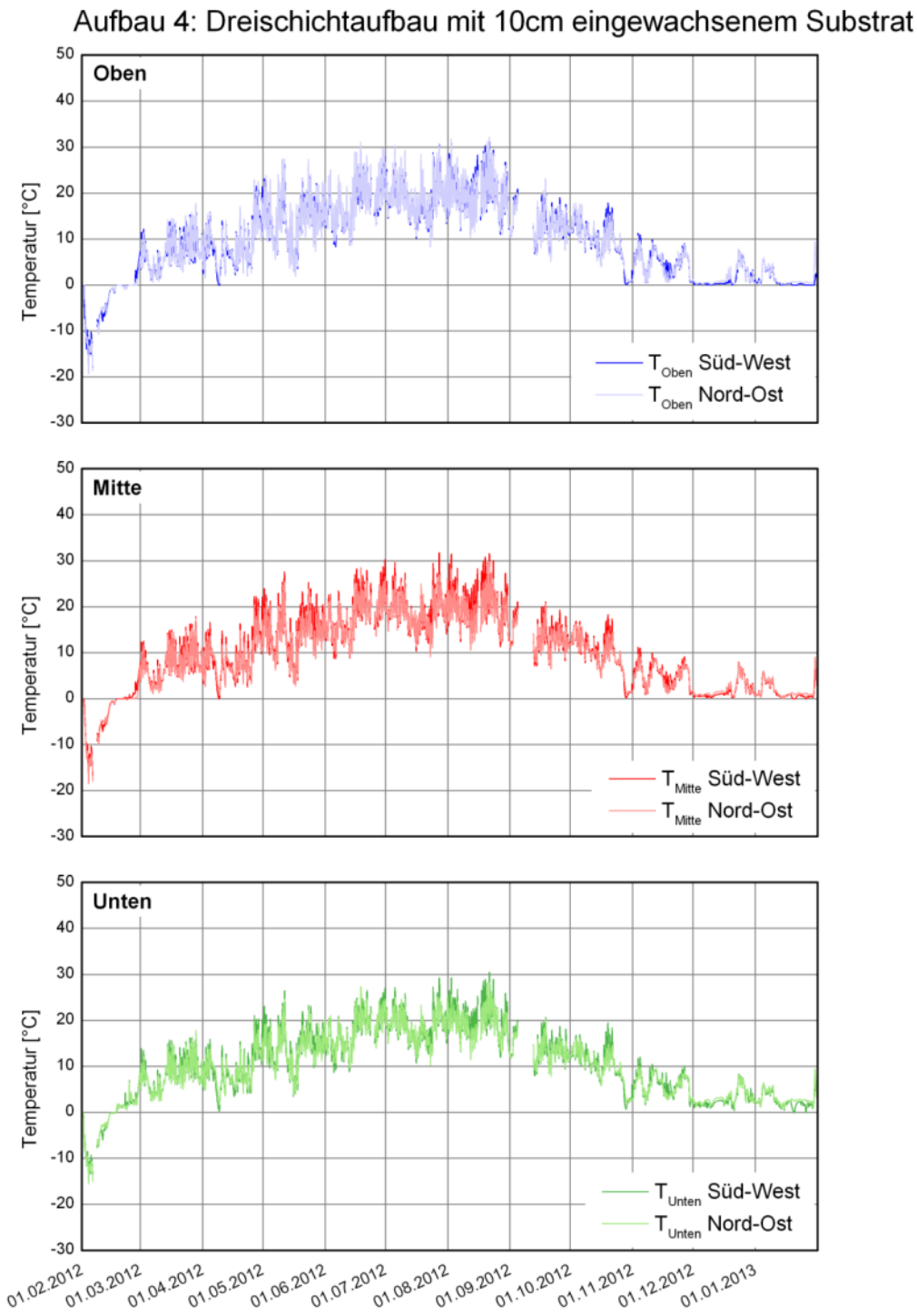


Bild 41:
Verlauf der stündlich gemessenen Temperaturen im Dachaufbau 4 am Standort Holzkirchen über den Versuchszeitraum vom 01. Februar 2012 bis 01. Februar 2013. Die Messung erfolgte in drei unterschiedlichen Höhen im Substrat (oben, Mitte, unten) sowie jeweils an zwei Positionen (Nord-Ost, Süd-West).

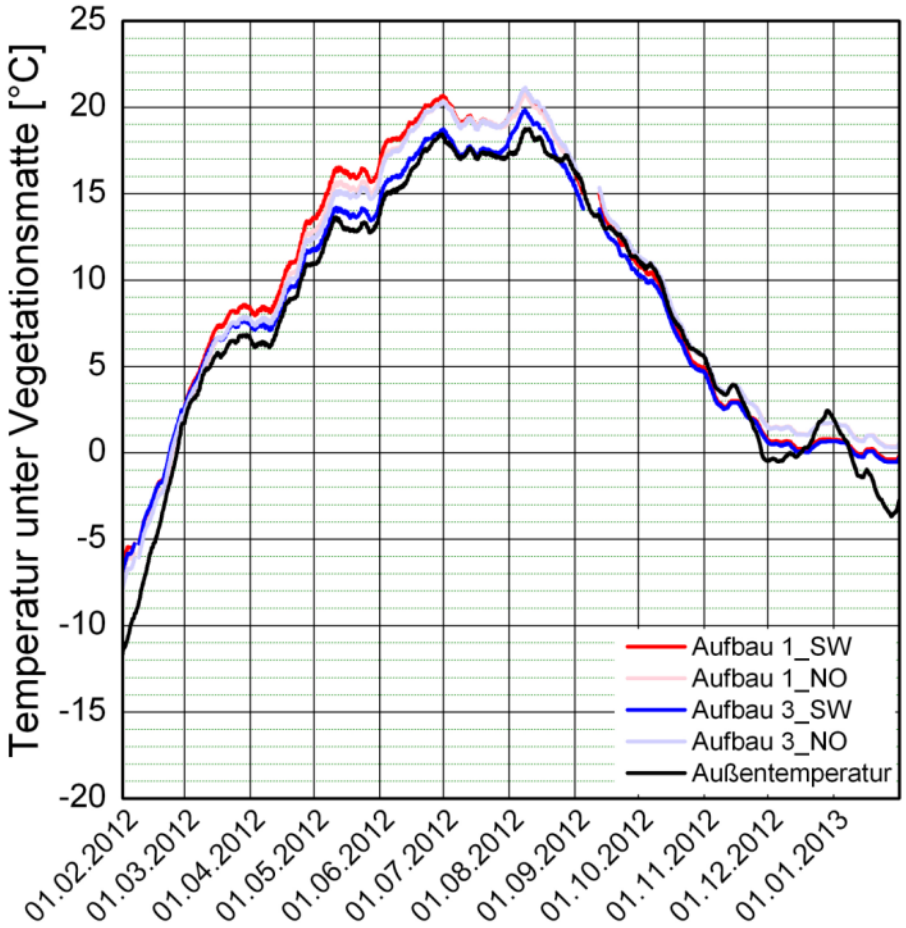


Bild 42:
Gleitendes Monatsmittel der gemessenen Temperaturen unter der Vegetationsmatte in Dachaufbau 1 und 3 im Vergleich zur Außentemperatur am Standort Holzkirchen über den Versuchszeitraum vom 01. Februar 2012 bis 01. Februar 2013.

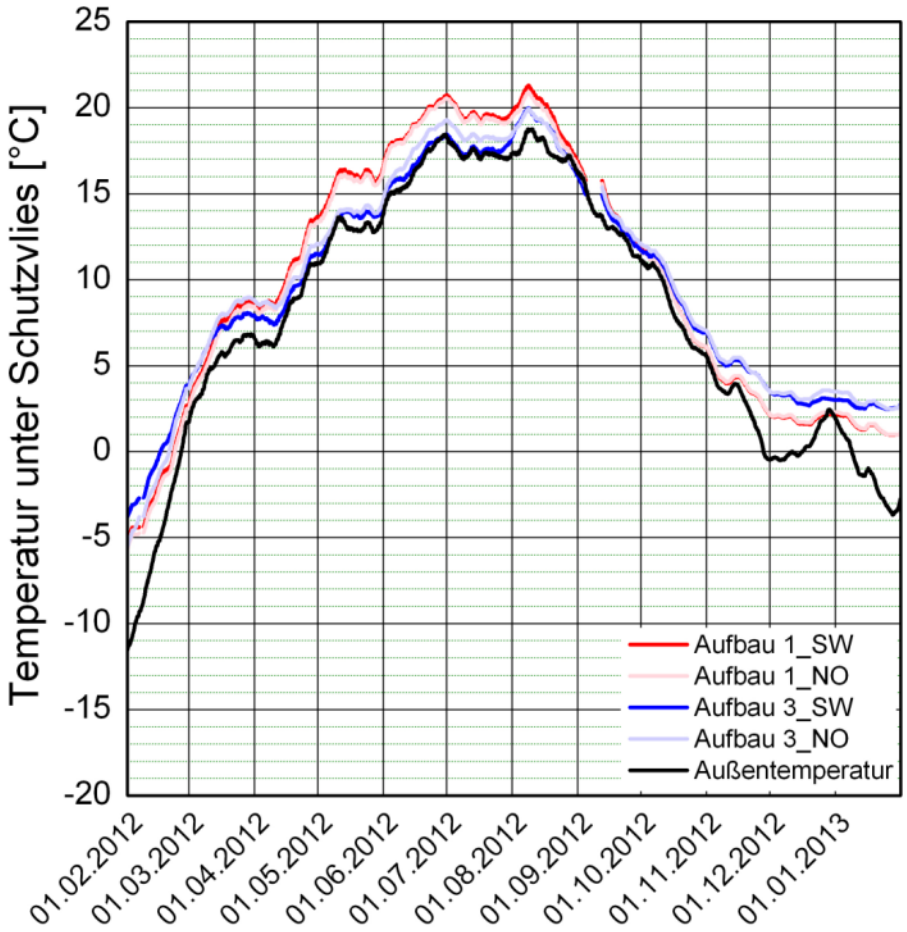


Bild 43:
Gleitendes Monatsmittel der gemessenen Temperaturen unter dem Schutz- und Speichervlies in Dachaufbau 1 und 3 im Vergleich zur Außentemperatur am Standort Holzkirchen über den Versuchszeitraum vom 01. Februar 2012 bis 01. Februar 2013.

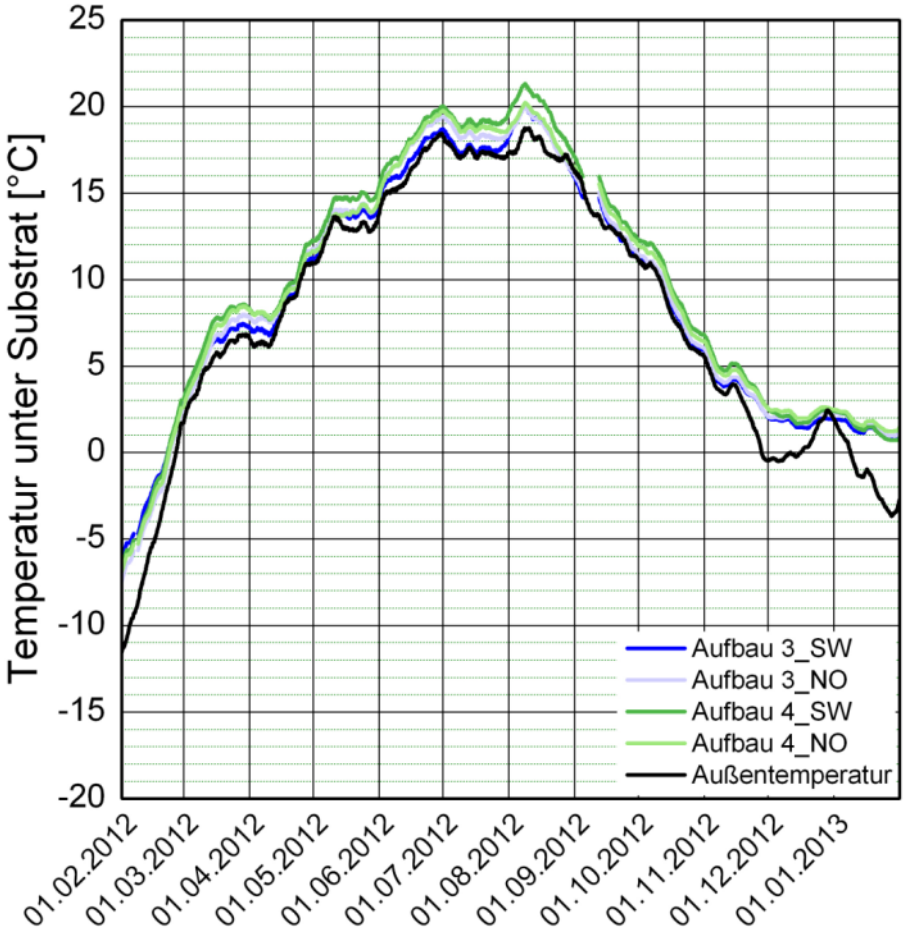


Bild 44:
Gleitendes Monatsmittel der gemessenen Temperaturen unter dem Substrat in Dachaufbau 3 und 4 im Vergleich zur Außentemperatur am Standort Holzkirchen über den Versuchszeitraum vom 01. Februar 2012 bis 01. Februar 2013.

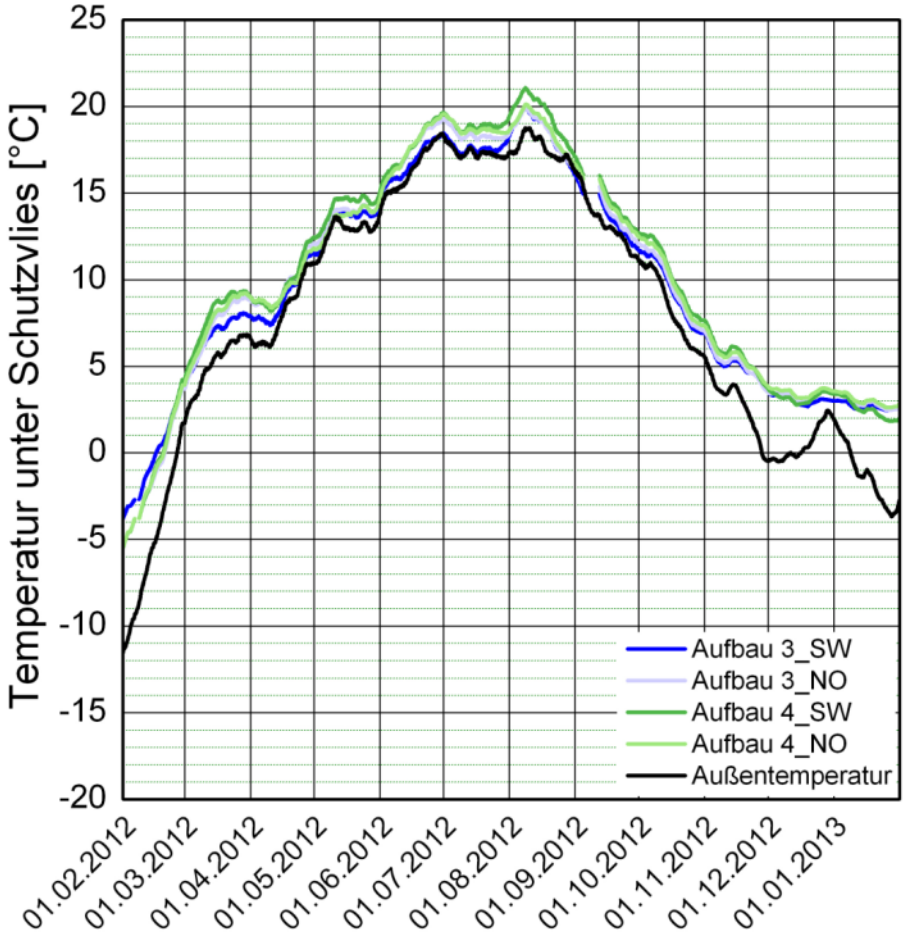


Bild 45:
Gleitendes Monatsmittel der gemessenen Temperaturen unter dem Schutz- und Speichervlies in Dachaufbau 3 und 4 im Vergleich zur Außentemperatur am Standort Holzkirchen über den Versuchszeitraum vom 01. Februar 2012 bis 01. Februar 2013.

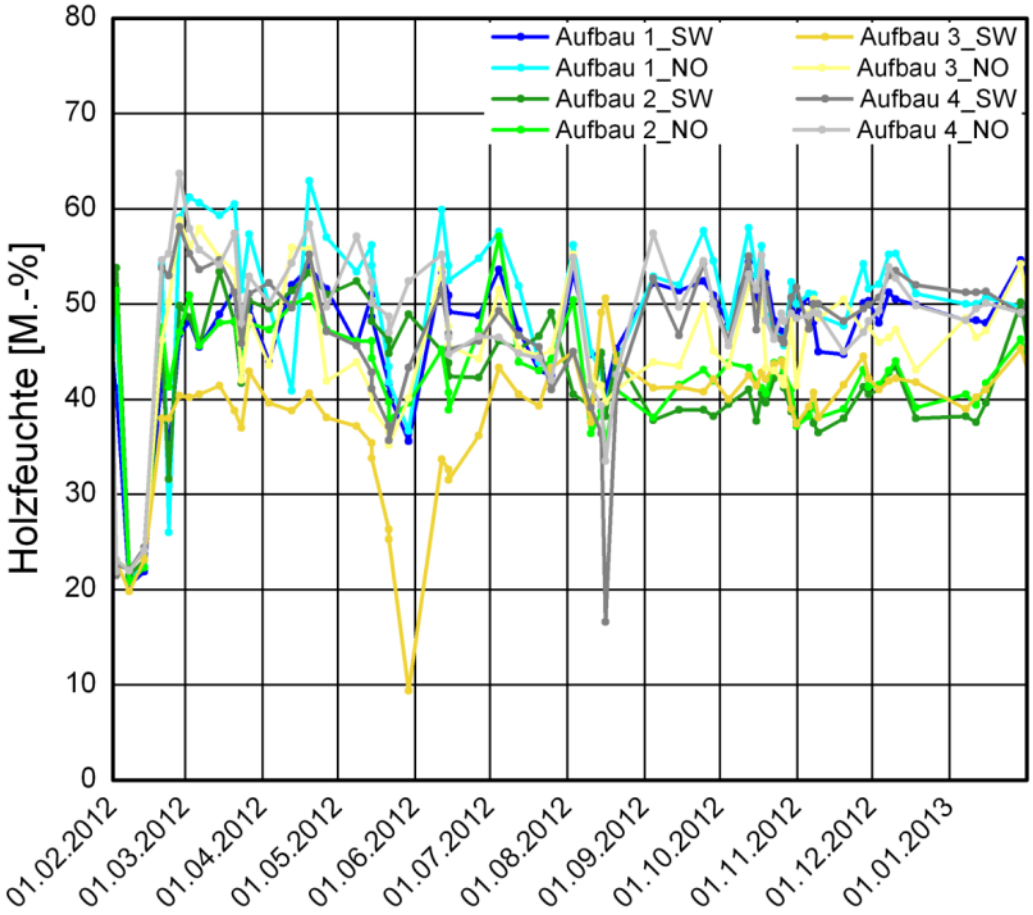


Bild 46:
Verlauf der gemessenen Holzfeuchten in den vier Dachaufbauten (je zwei Fühler pro Aufbau) am Standort Holzkirchen über den Versuchszeitraum vom 01. Februar 2012 bis 01. Februar 2013.

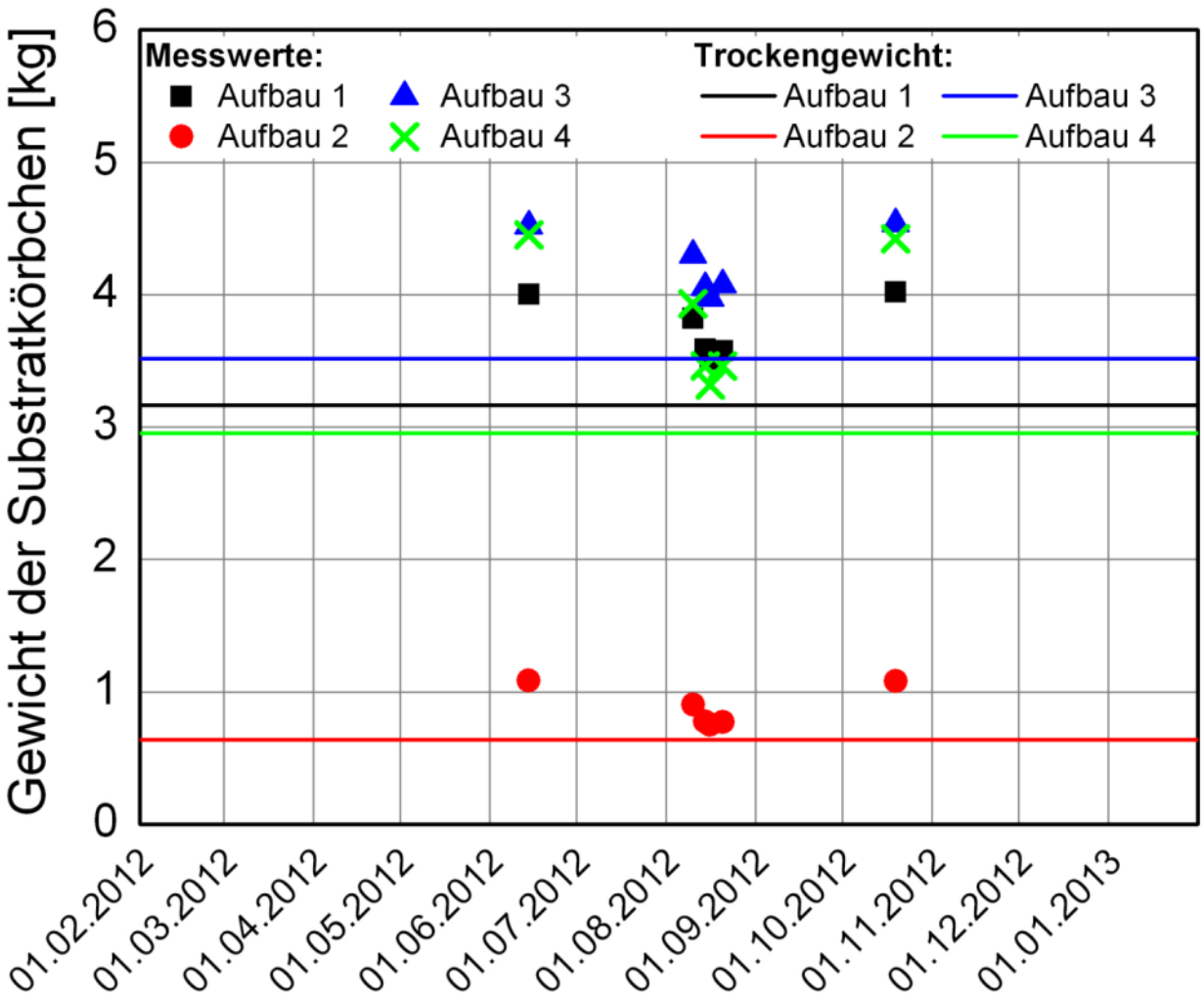


Bild 47:
Darstellung der Messwerte (Punkte) von der Wägung der in die Dachaufbauten am Standort Holzkirchen integrierten Substratkörbchen über den Versuchszeitraum vom 01. Februar 2012 bis 01. Februar 2013. Im Vergleich dazu ist das jeweilige Trockengewicht der Substratkörbchen als Linie dargestellt.



Bild 48:
Fotografische Aufnahme des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des Diffusionswiderstandes am Beispiel des „Leichtsubstrats Typ L“.



Bild 49:
Fotografische Aufnahme des Versuchsaufbaus zur Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten (oben: vor dem Kontakt mit Wasser, unten: gegen Ende des Versuchs nach dem Vollsaugen der Probe).



Bild 50:
Fotografische Aufnahme des Versuchsaufbaus zum Trocknungsversuch.

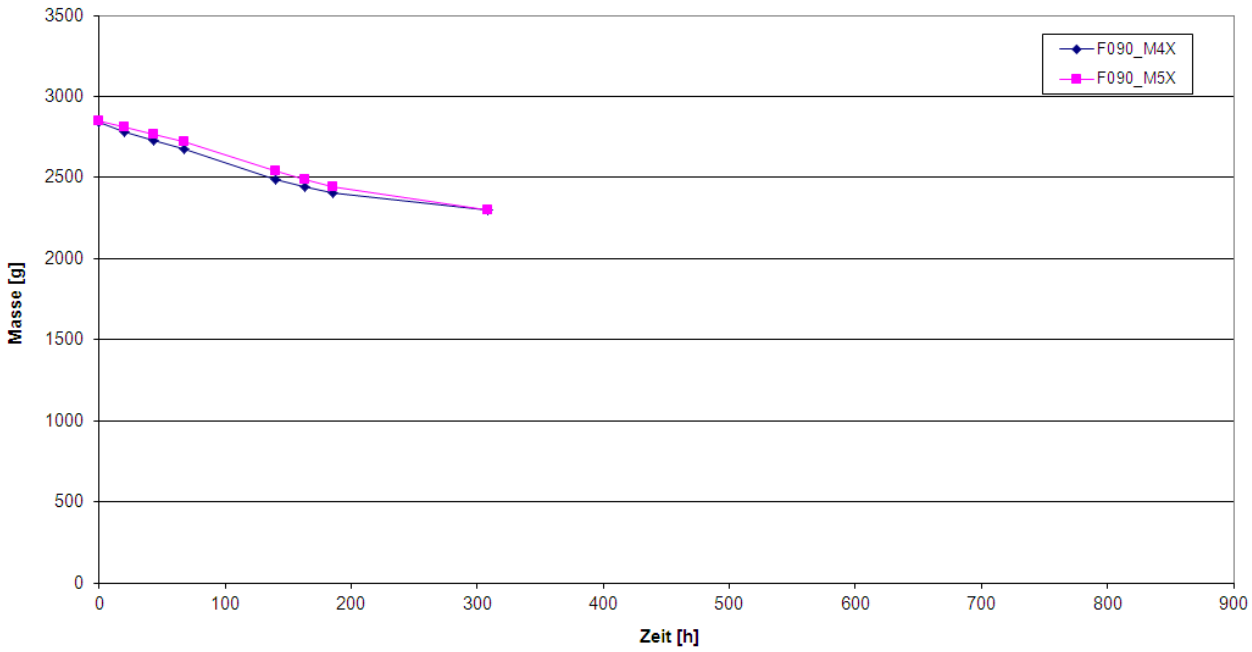


Bild 51:
Darstellung des Gewichtsverlaufs beim Trocknungsversuch für das „Extensiv-Einschichtsubstrat Typ M“ der Fa. Optigrün.

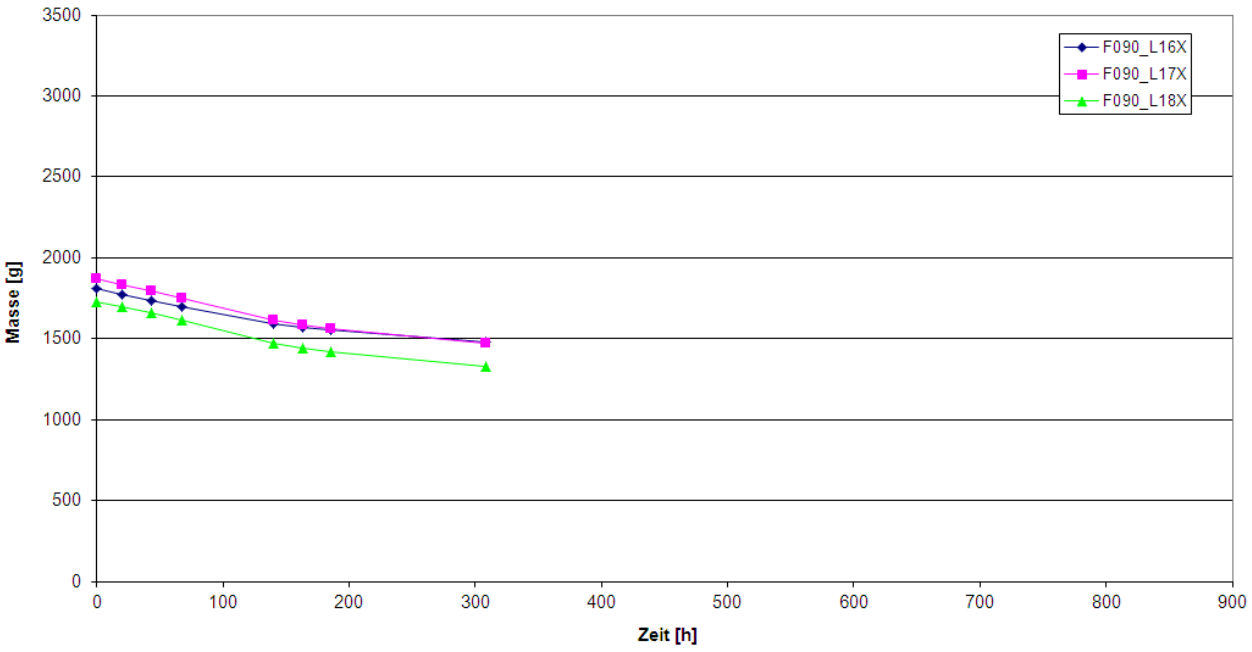


Bild 52:
Darstellung des Gewichtsverlaufs beim Trocknungsversuch für das „Leichtsubstrat Typ L“ der Fa. Optigrün.

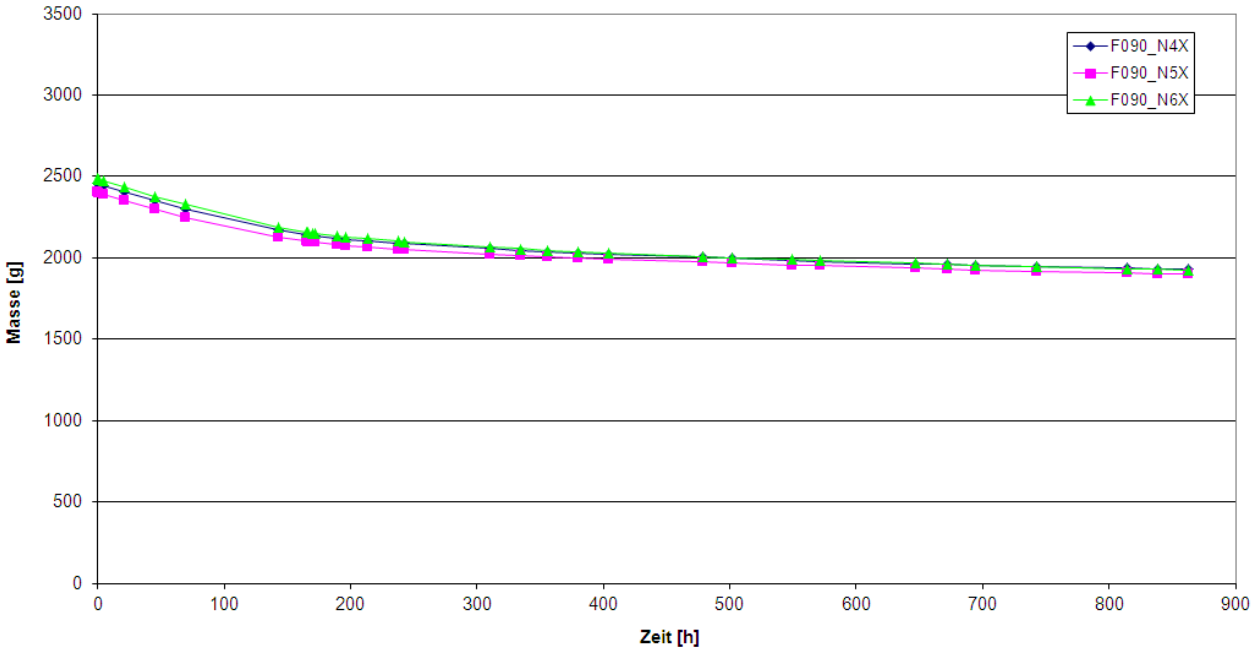


Bild 53:
Darstellung des Gewichtsverlaufs beim Trocknungsversuch für das „Extensiv-Mehrschichtsubstrat Typ E (neu)“ der Fa. Optigrün.

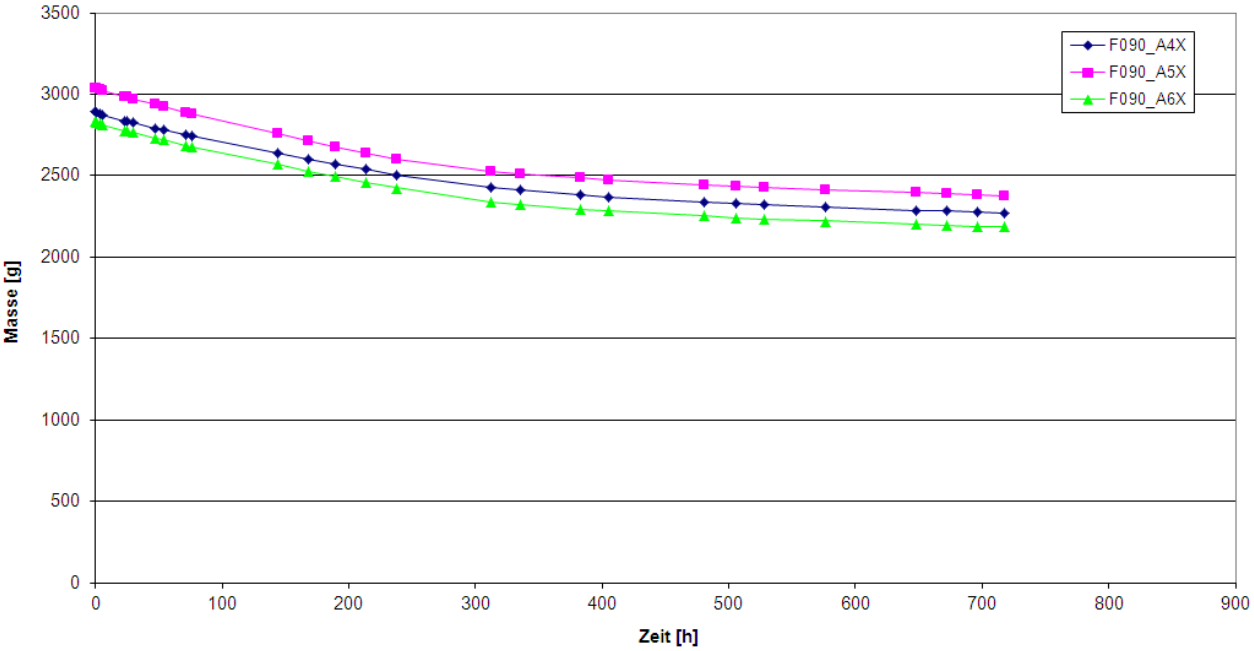


Bild 54:
Darstellung des Gewichtsverlaufs beim Trocknungsversuch für das „Extensiv-Mehrschichtsubstrat Typ E (ausgebaut, durchwurzelt)“ der Fa. Optigrün.



Bild 55:
Fotografische Aufnahme des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der freien Wassersättigung.



Bild 56:
Fotografische Aufnahme des Versuchsaufbaus zur Bestimmung der Sorptionsfeuchte (hier bei 93 % relativer Feuchte).

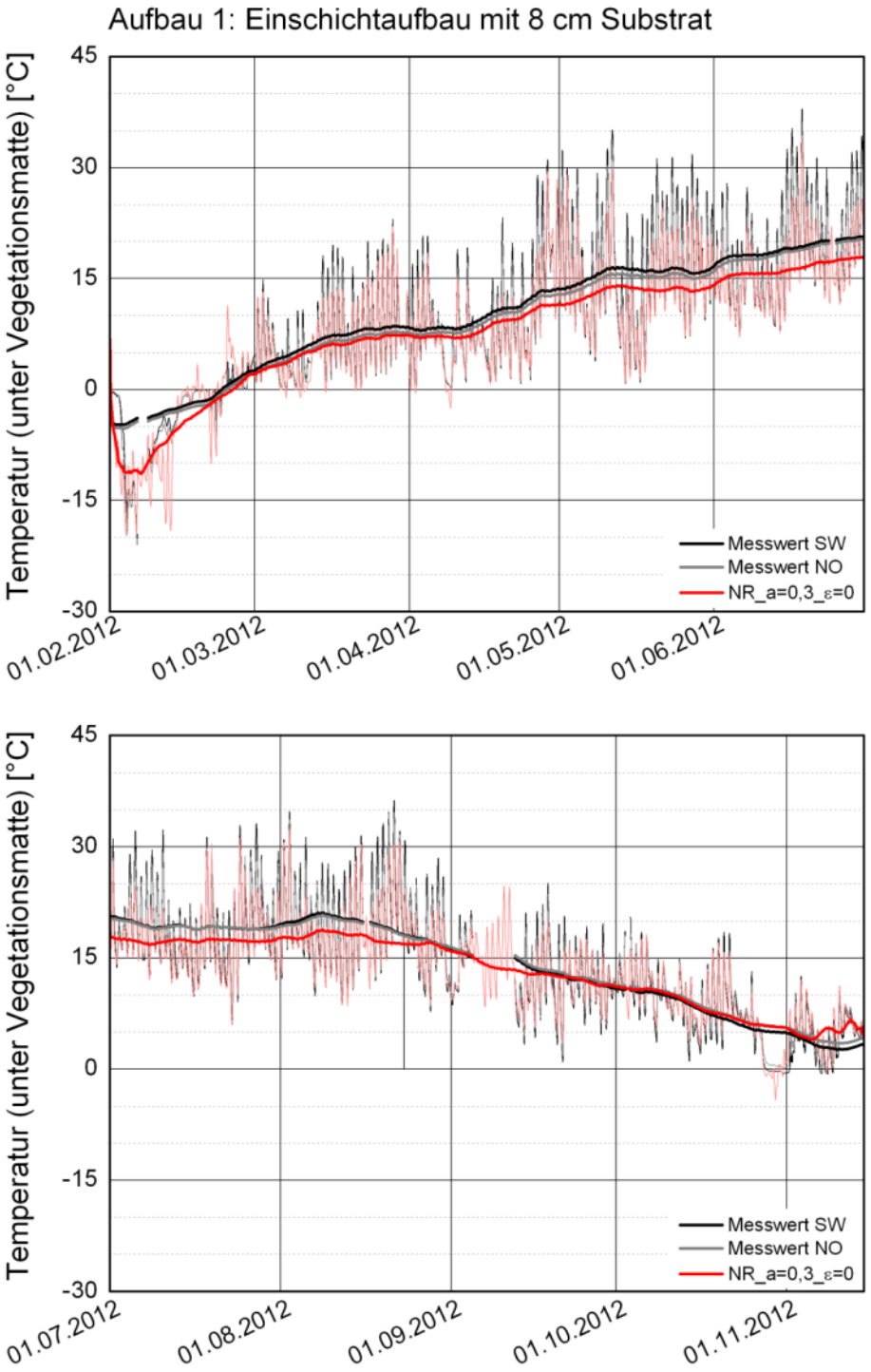


Bild 57:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter der Vegetationsmatte von Dachaufbau 1 mit dem generischen Berechnungsmodell (rot) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

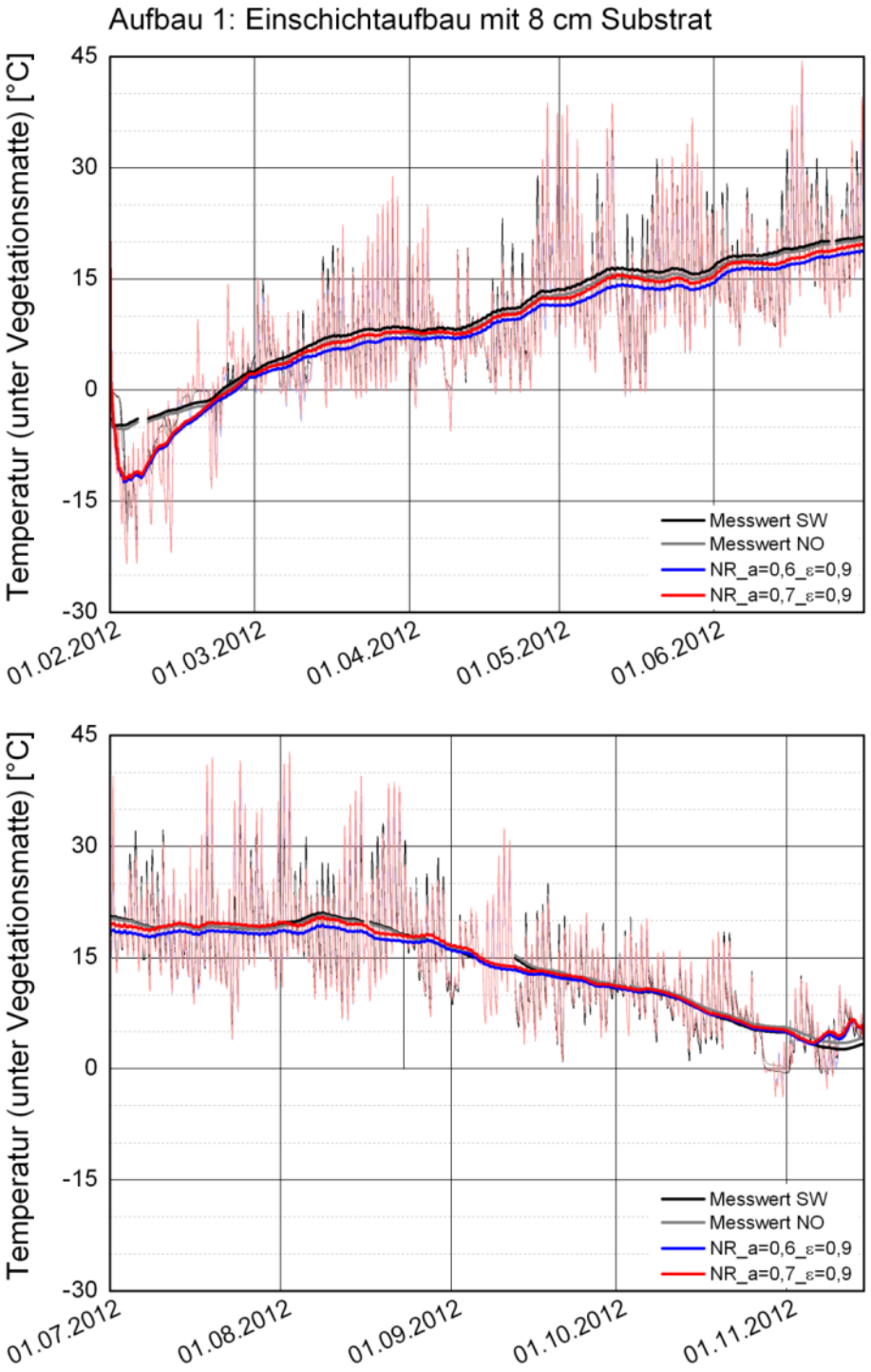


Bild 58:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter der Vegetationsmatte von Dachaufbau 1 in Abhängigkeit von der kurzwelligen Strahlungsabsorption (blau / rot) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

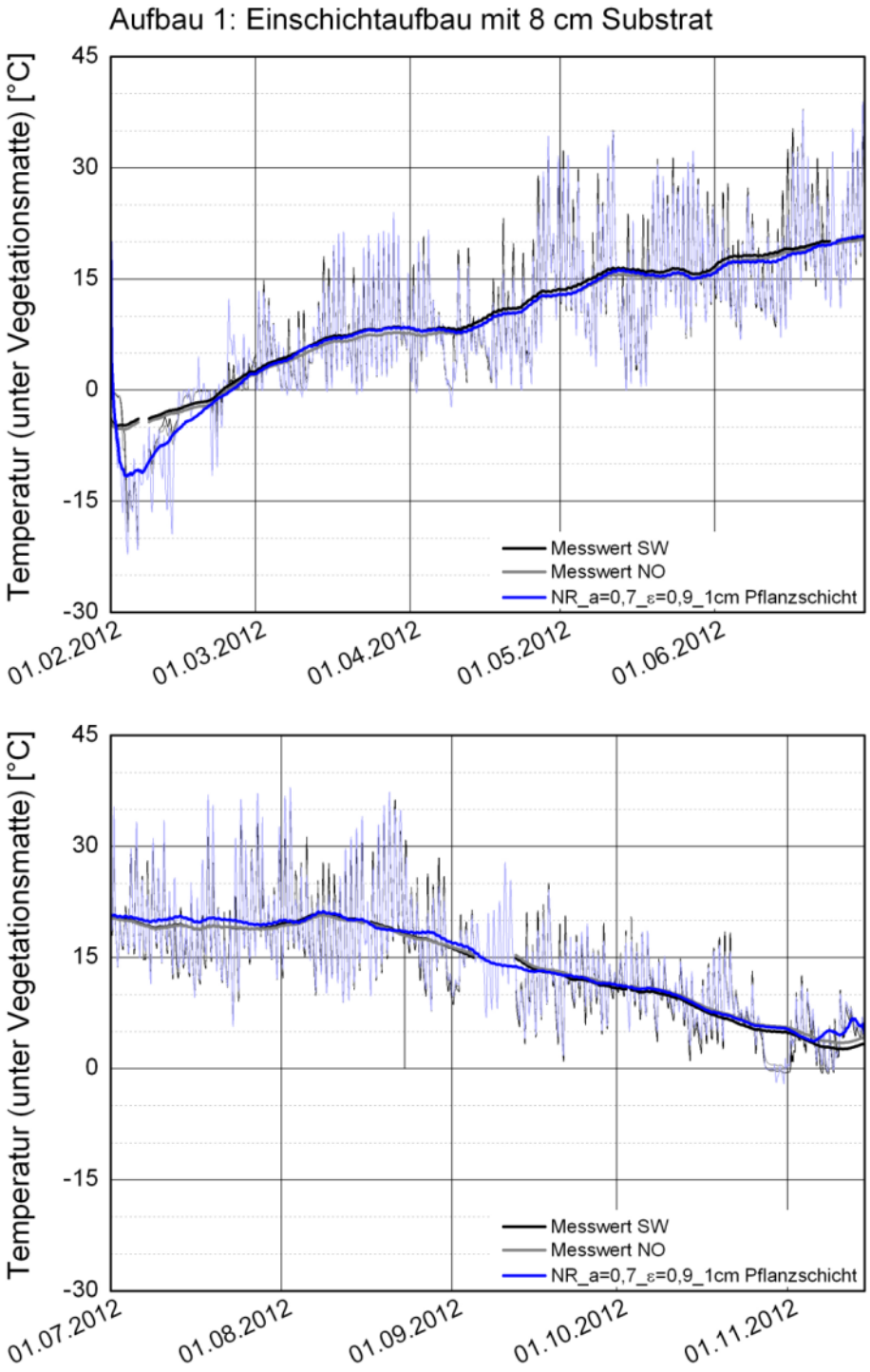


Bild 59:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter der Vegetationsmatte von Dachaufbau 1 mit einer zusätzlichen Pflanzschicht (blau) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

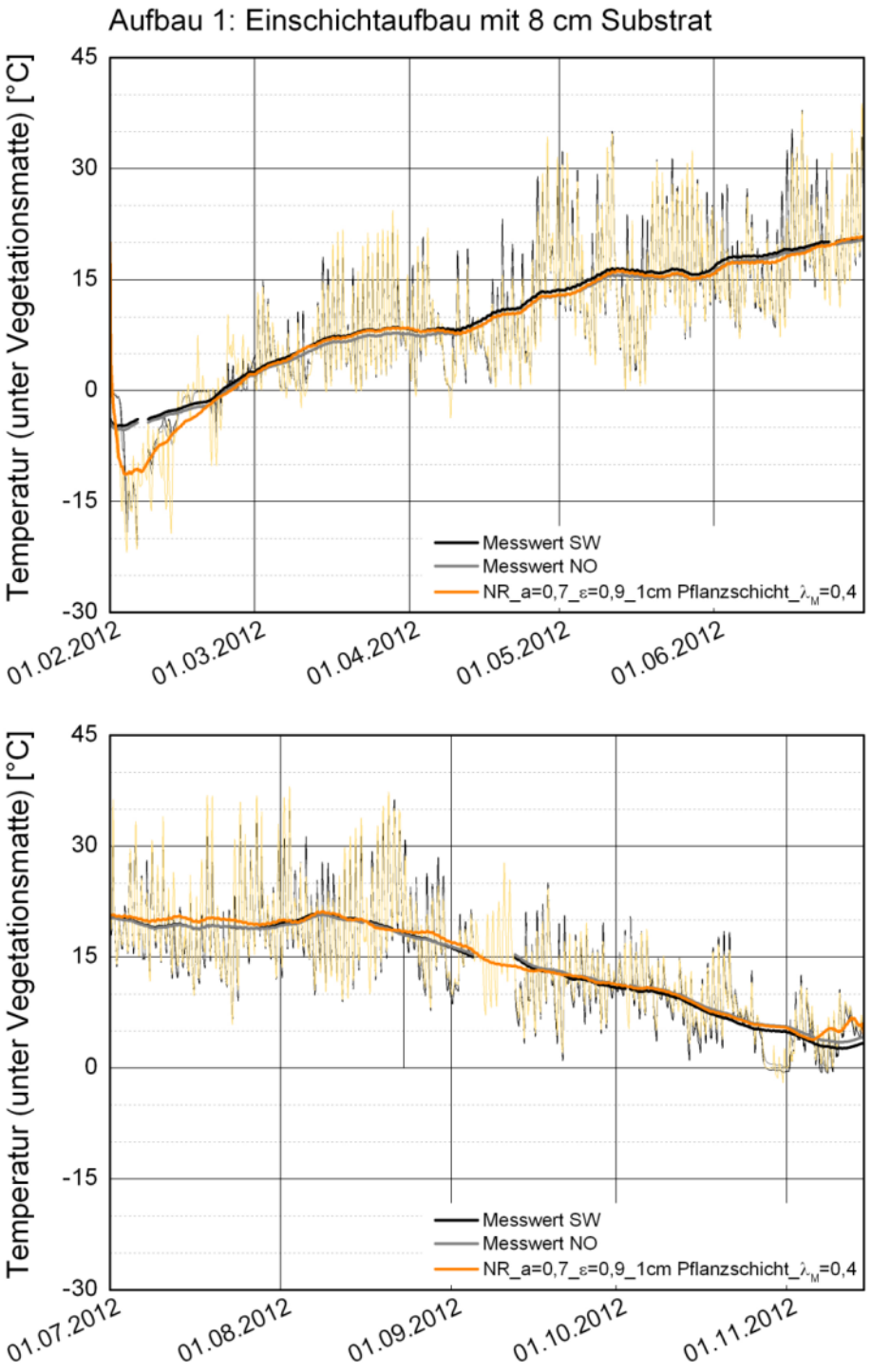


Bild 60:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter der Vegetationsmatte von Dachaufbau 1 mit geringerer Wärmeleitfähigkeit in der Substratschicht (orange) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

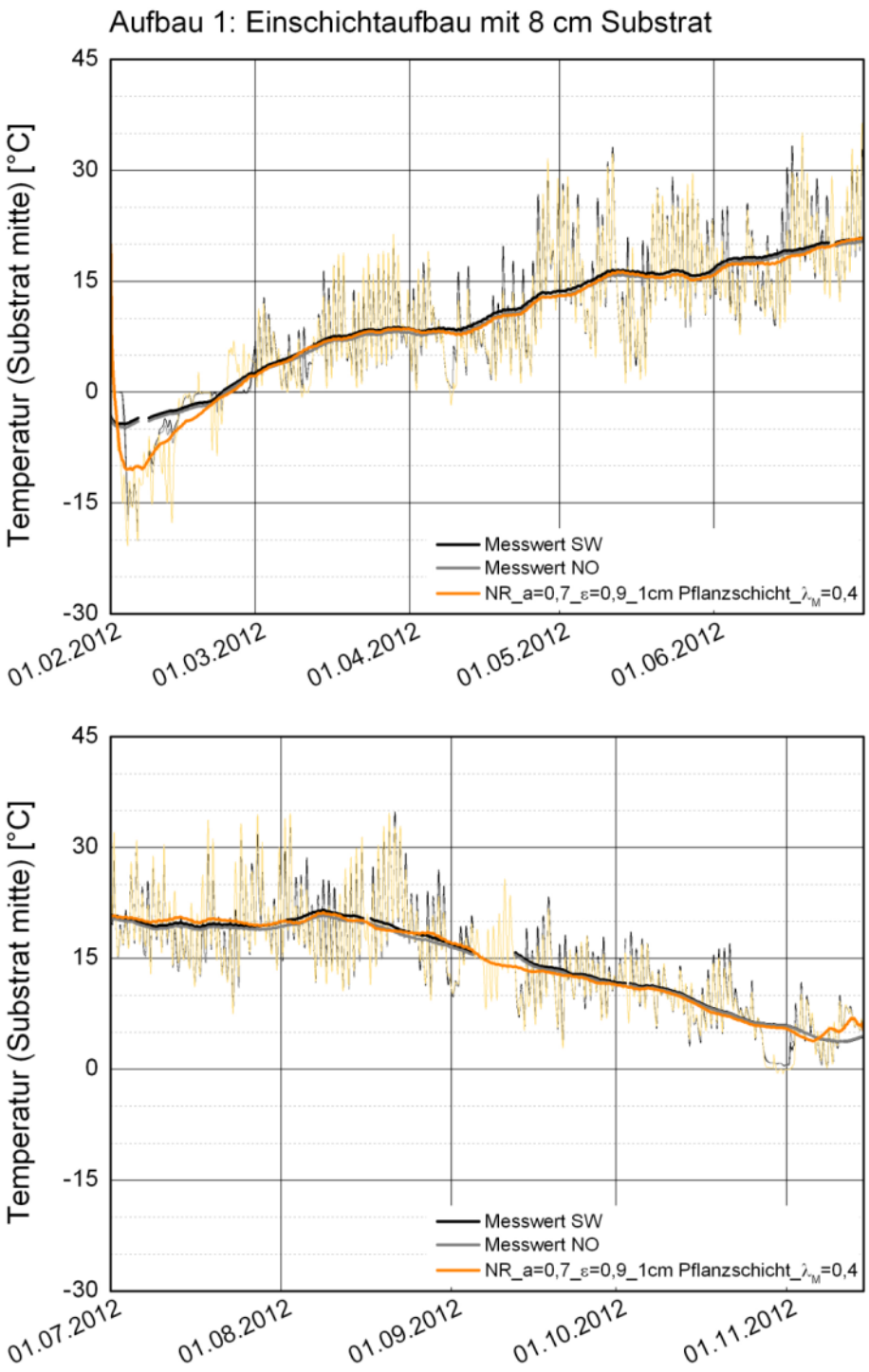


Bild 61:
Berechneter Verlauf der Temperaturen in Substratmitte von Dachaufbau 1 mit geringerer Wärmeleitfähigkeit in der Substratschicht (orange) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

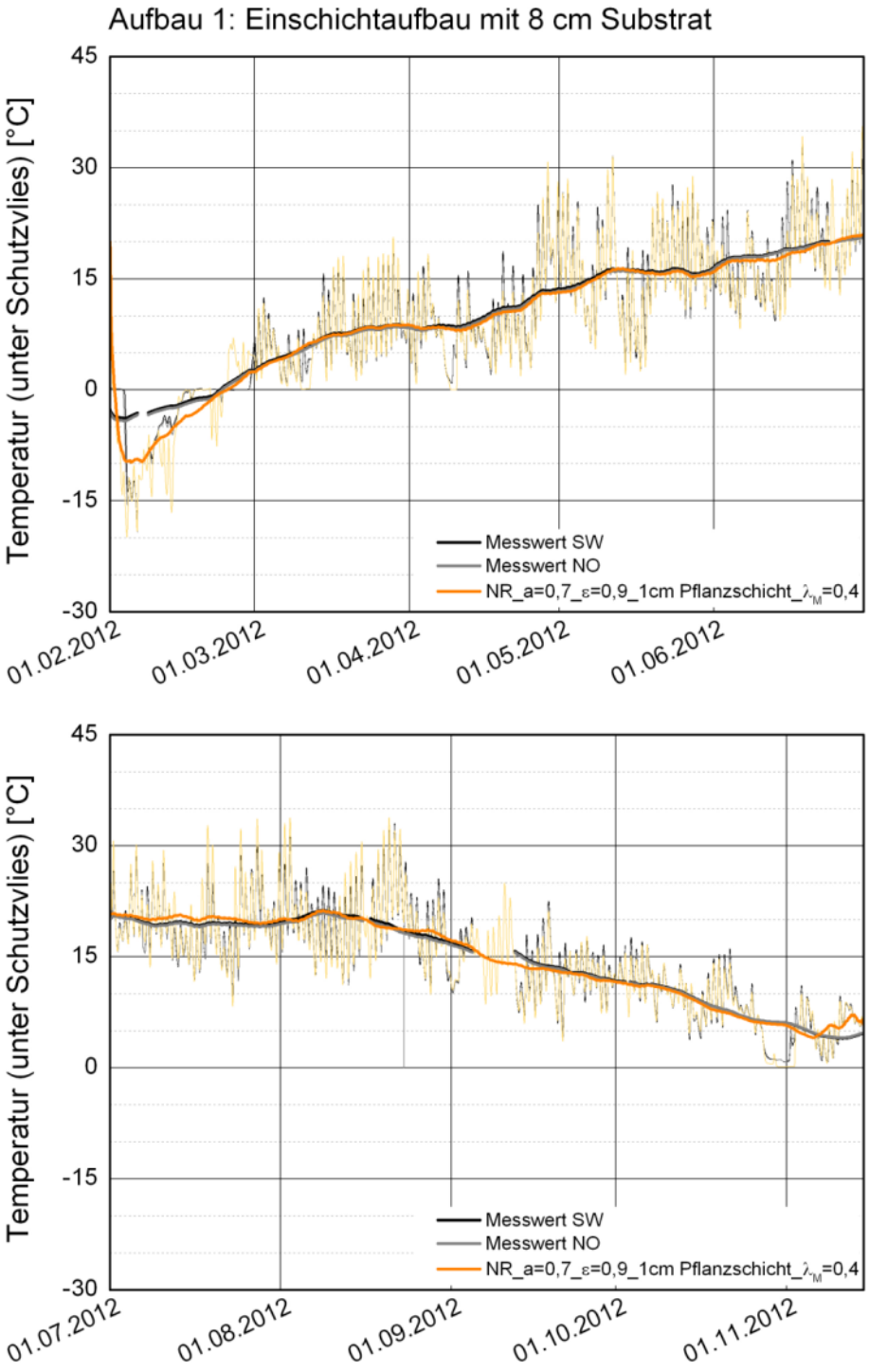


Bild 62:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter dem Schutz- und Speichervlies von Dachaufbau 1 mit geringerer Wärmeleitfähigkeit in der Substratschicht (orange) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

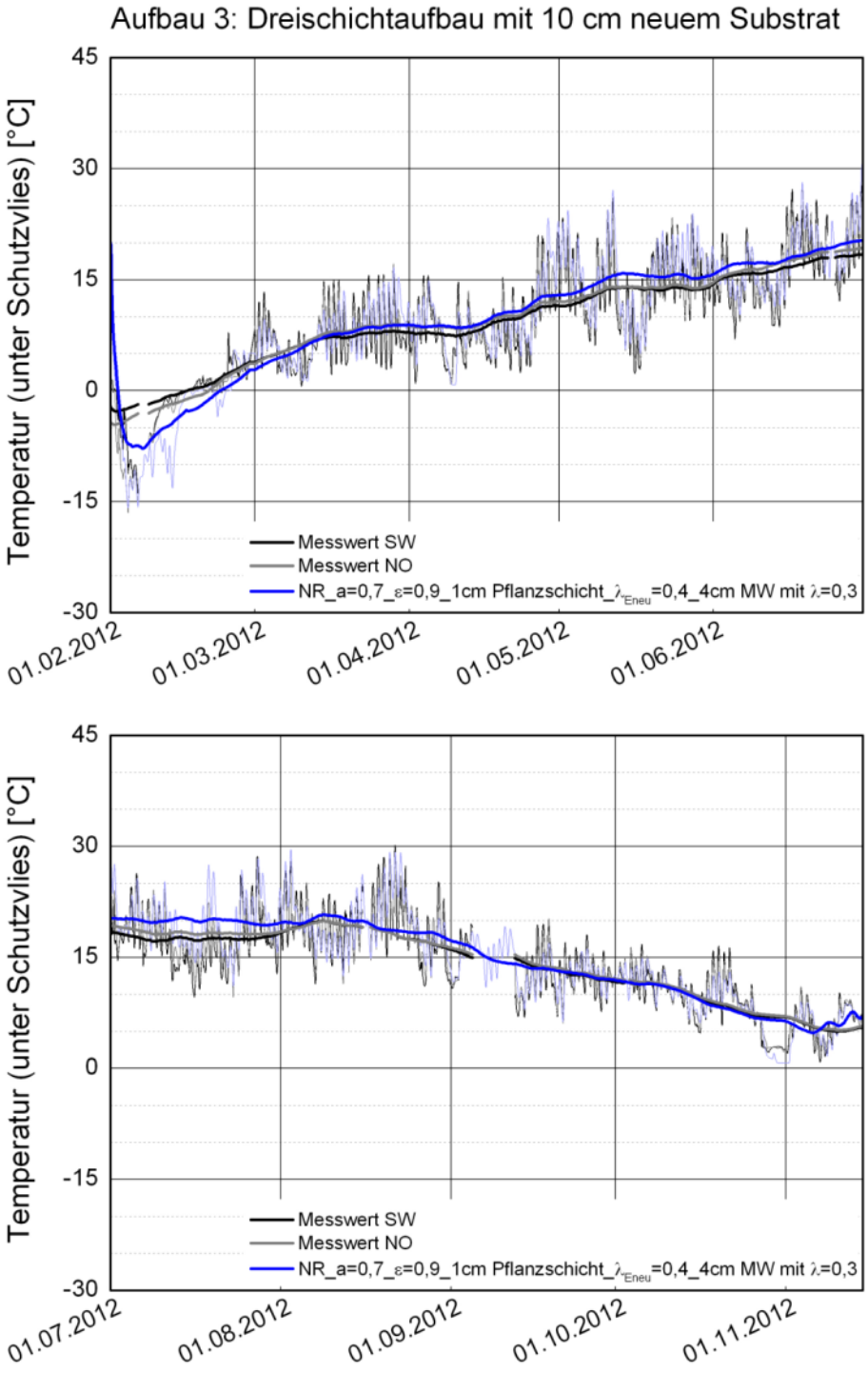


Bild 63:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter dem Schutz- und Speichervlies von Dachaufbau 3 im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

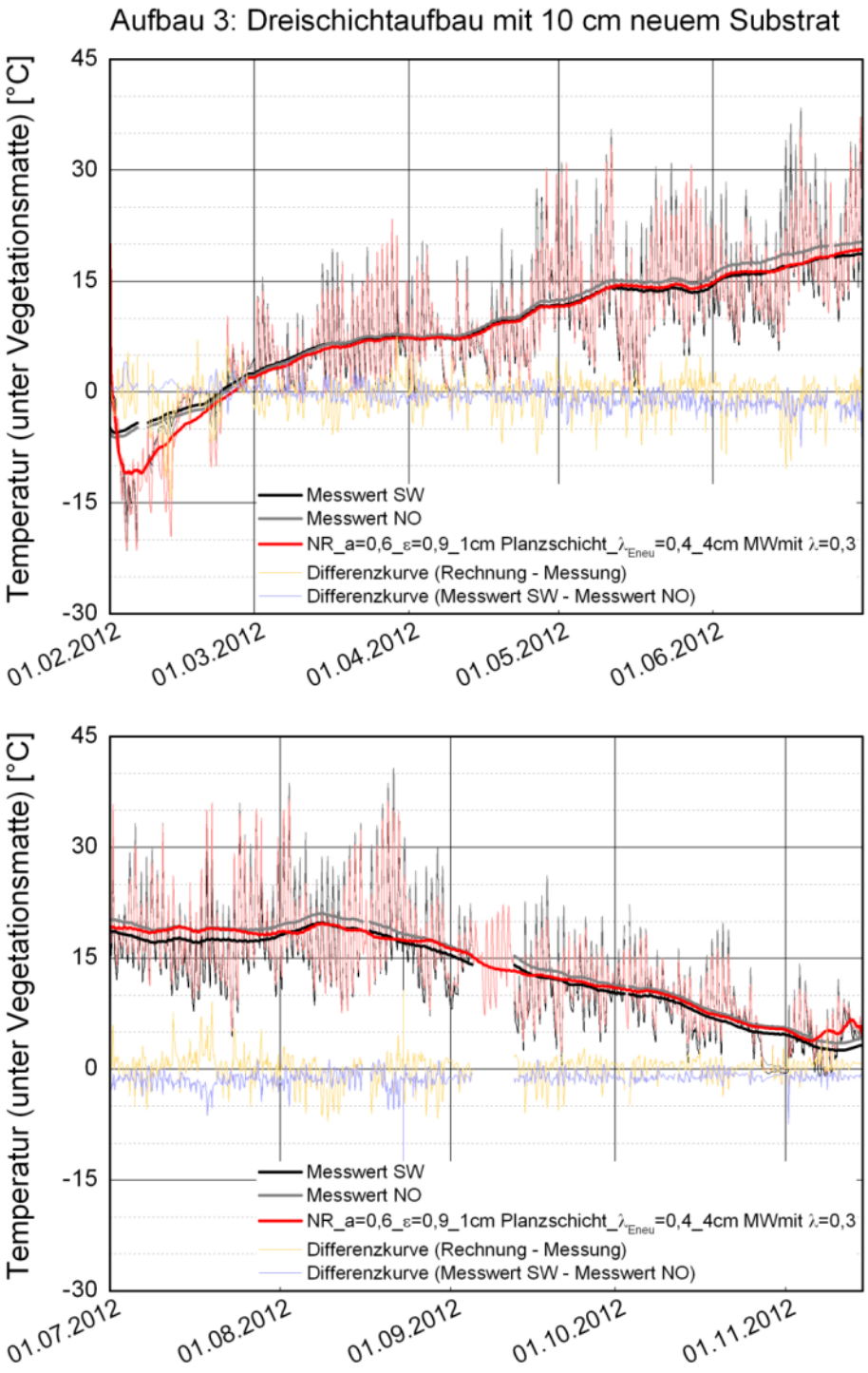


Bild 64:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter der Vegetationsmatte von Dachaufbau 3 mit einer kurzwelligen Strahlungsabsorption von 0,6 (rot) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

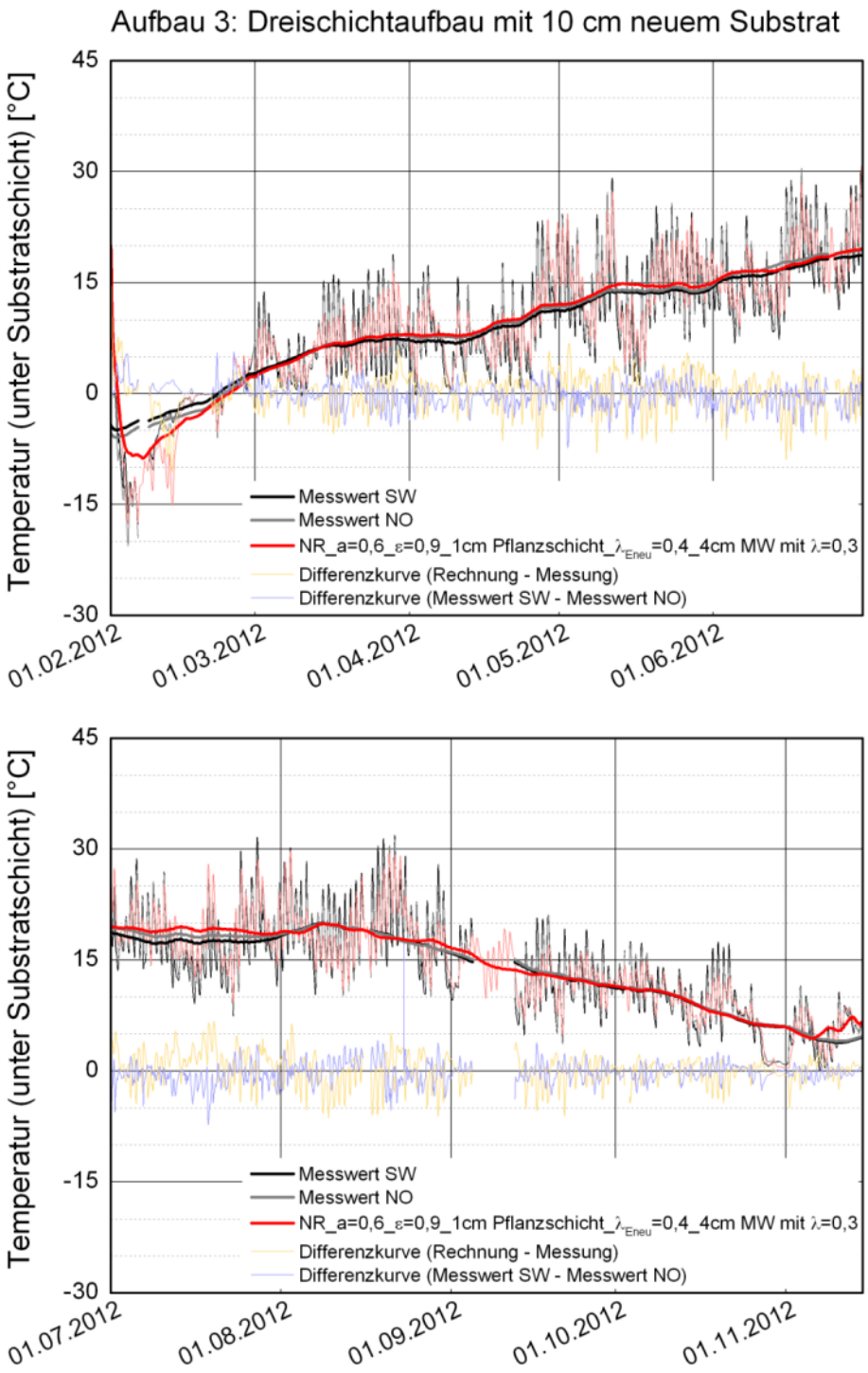


Bild 65:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter der Substratschicht von Dachaufbau 3 mit einer kurzwelligen Strahlungsabsorption von 0,6 (rot) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

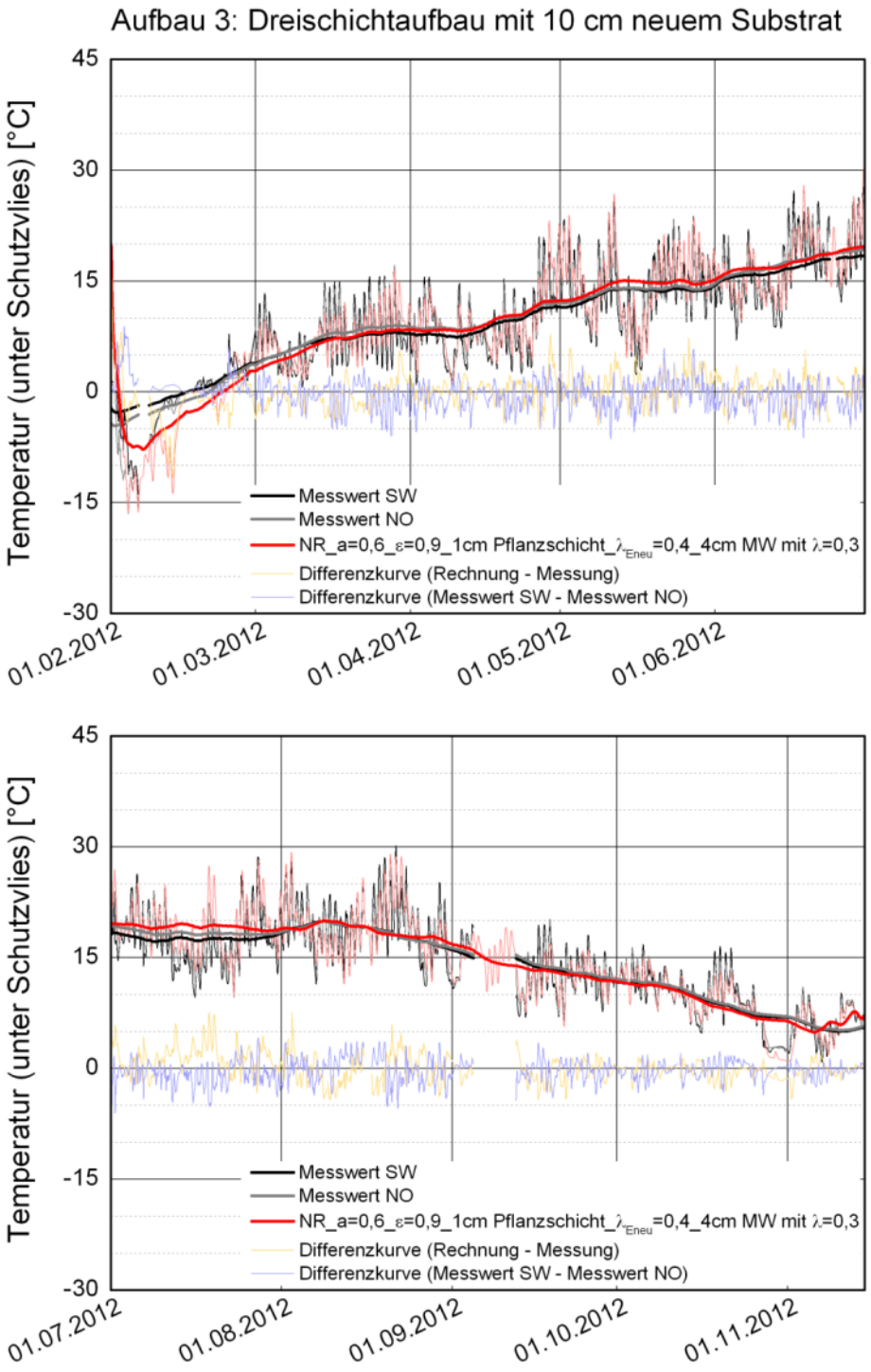


Bild 66:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter dem Schutz- und Speichervlies von Dachaufbau 3 mit einer kurzwelligen Strahlungsabsorption von 0,6 (rot) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

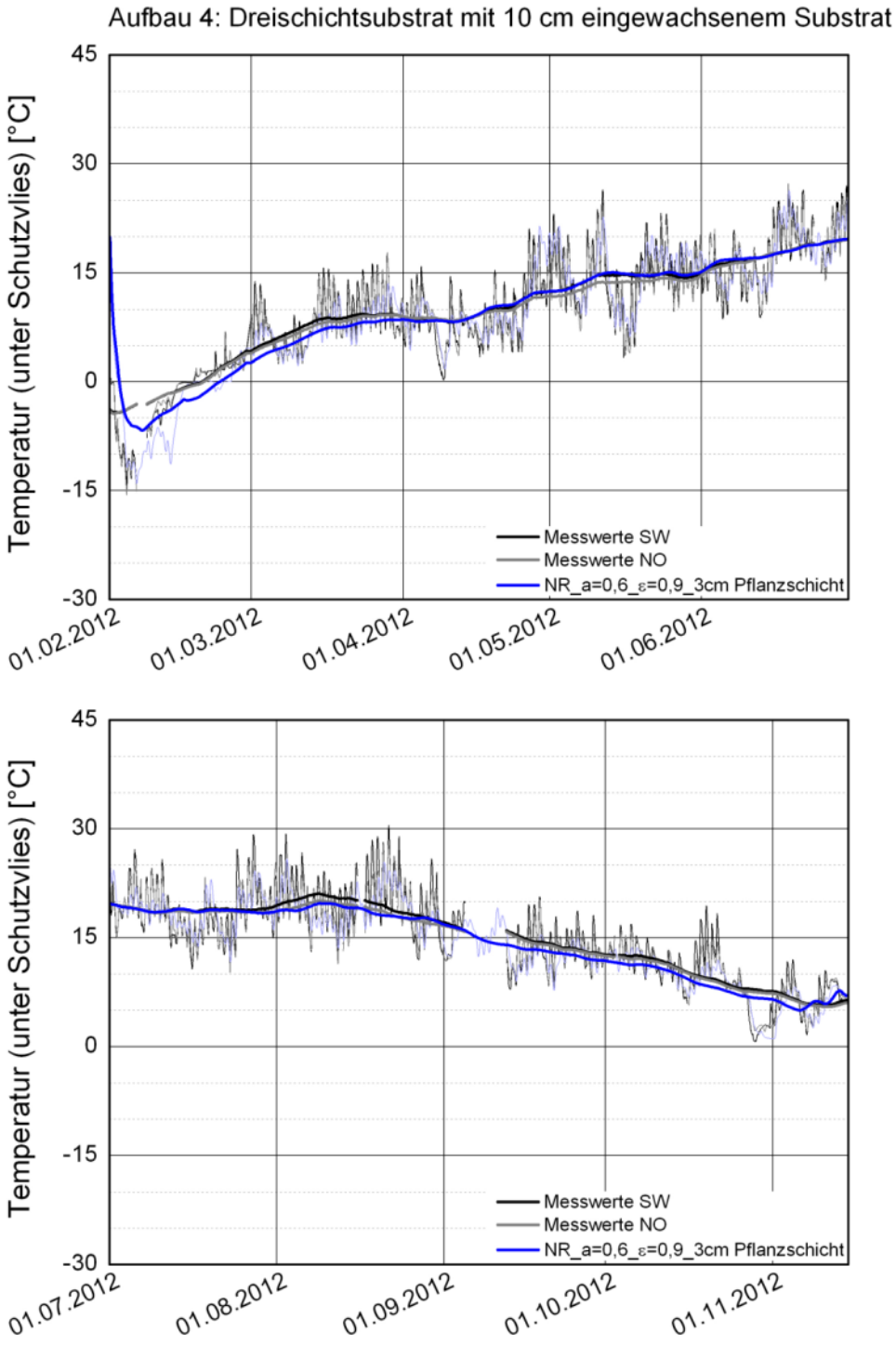


Bild 67:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter dem Schutz- und Speichervlies von Dachaufbau 4 mit einer 3cm dicken Pflanzschicht (blau) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

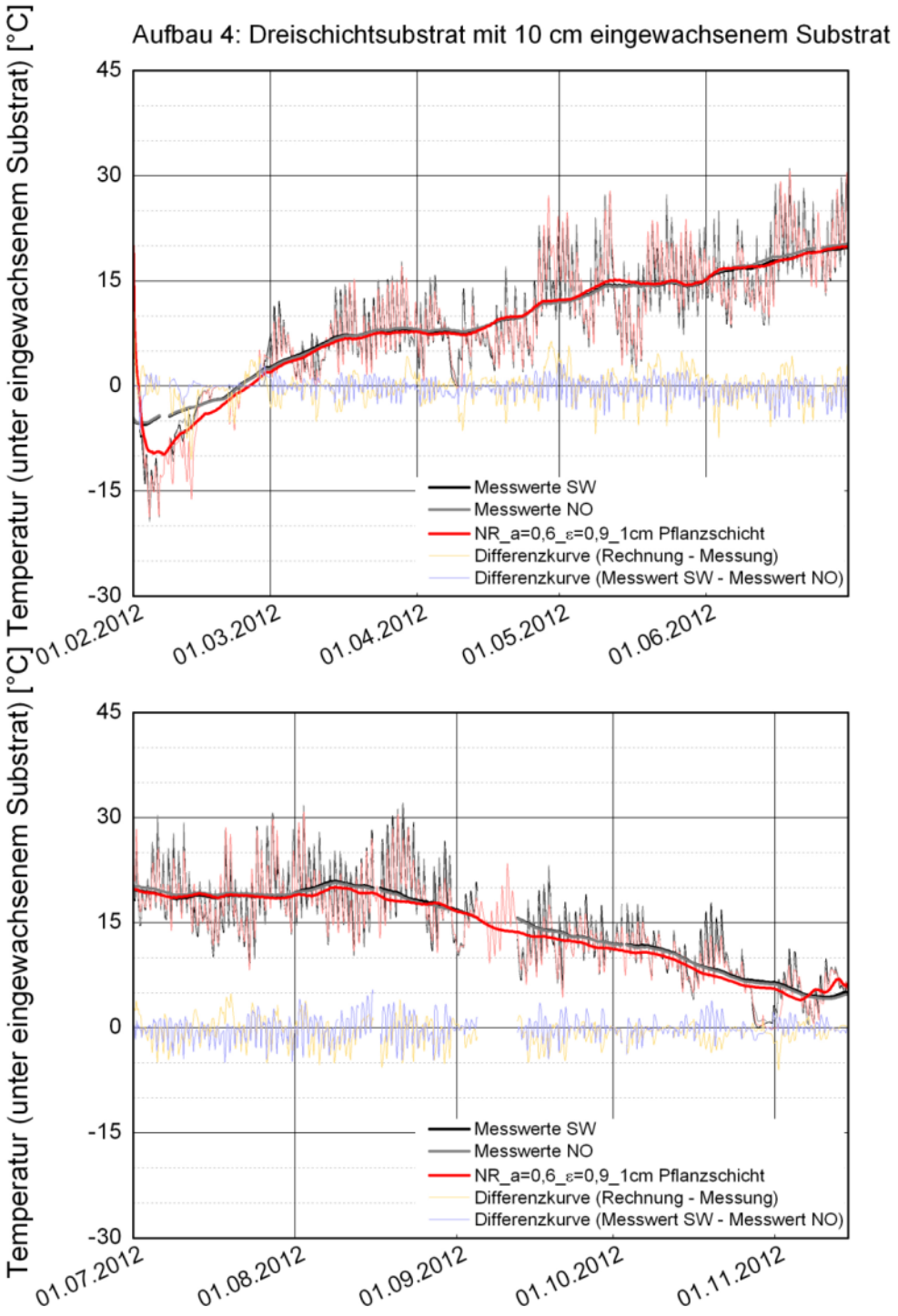


Bild 68:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter dem eingewachsenen Substrat von Dachaufbau 4 mit einer 1cm dicken Pflanzschicht (rot) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

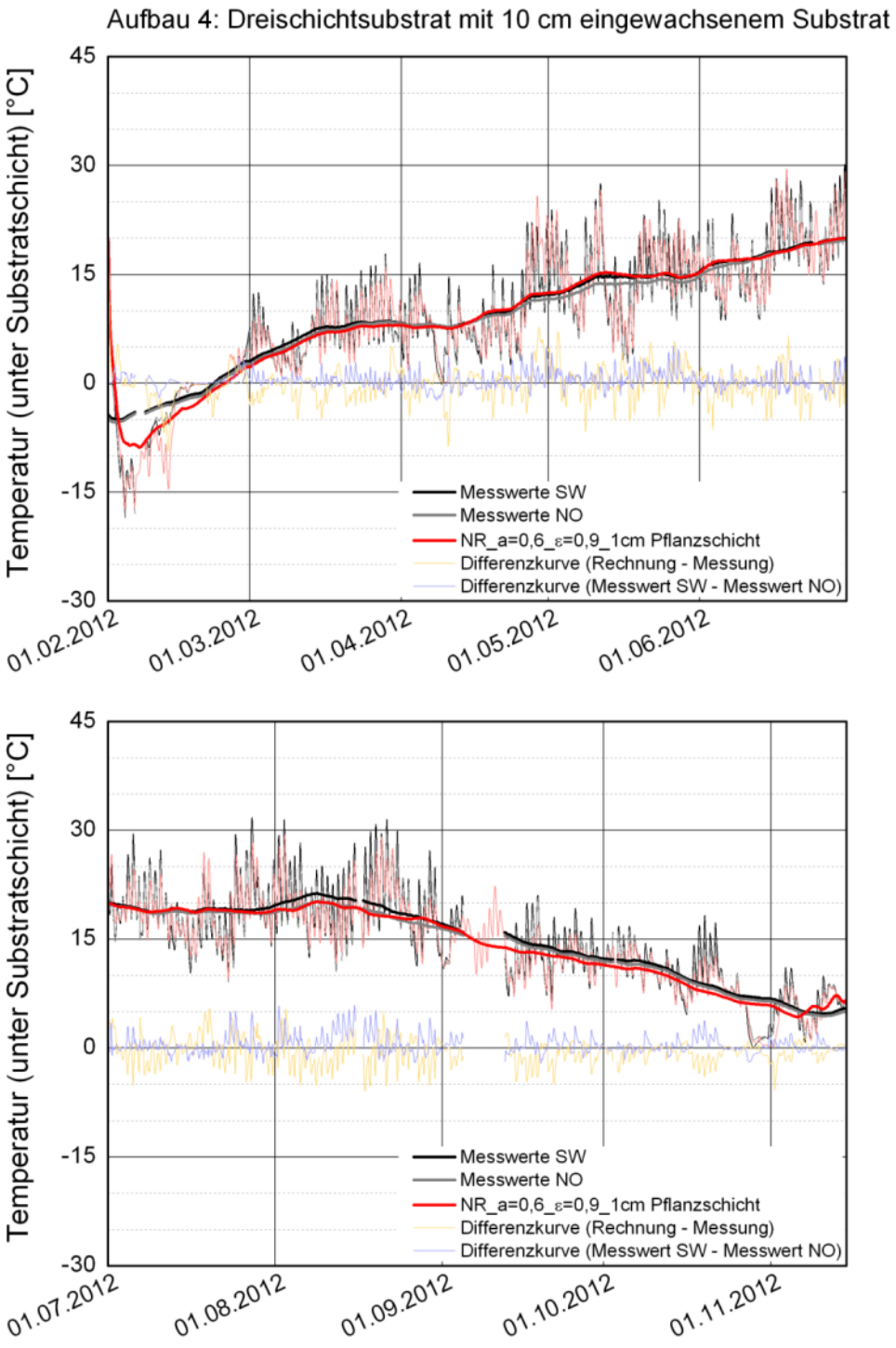


Bild 69:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter der Substratschicht von Dachaufbau 4 mit einer 1cm dicken Pflanzschicht (rot) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

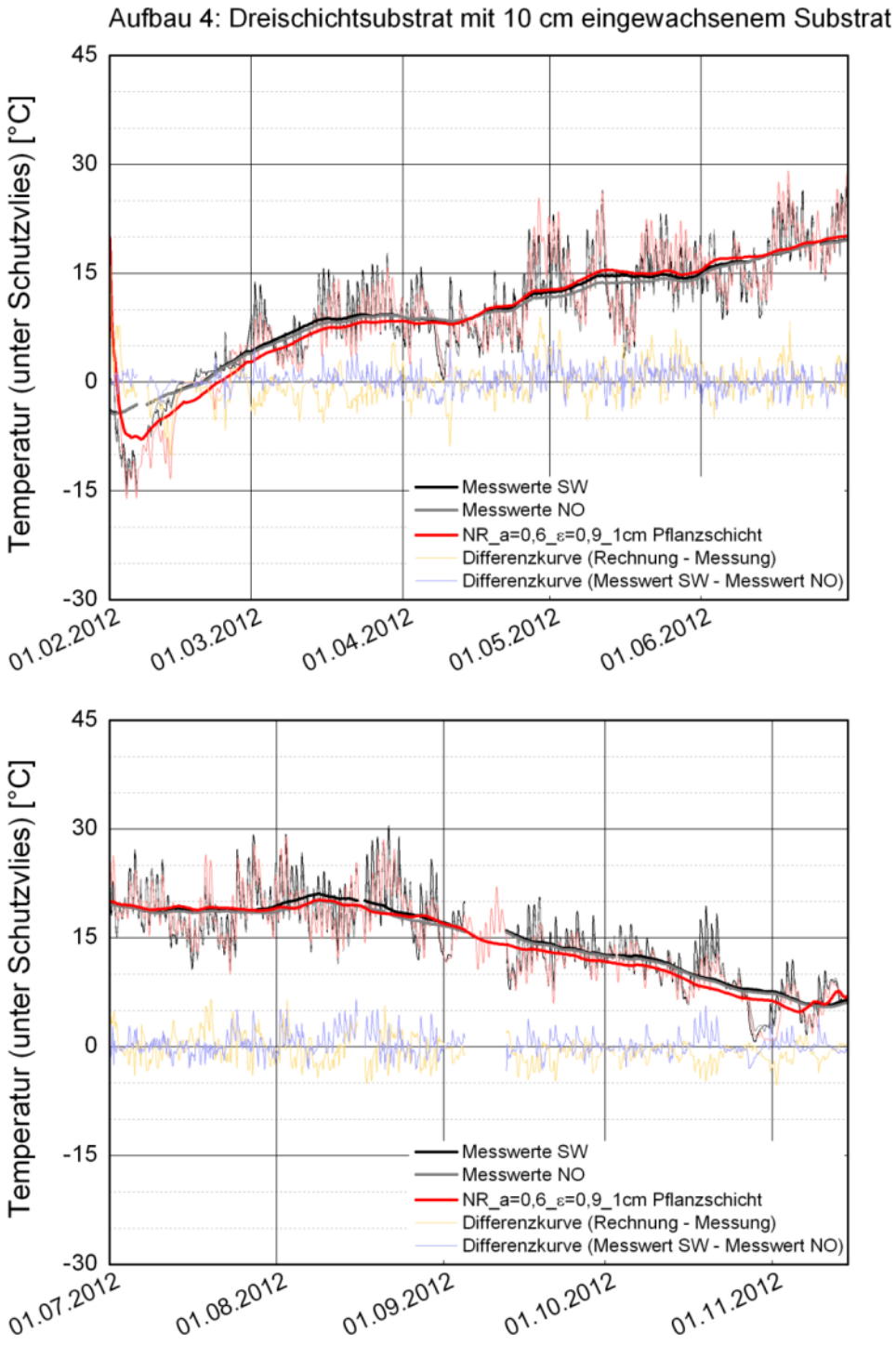


Bild 70:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter dem Schutz- und Speichervlies von Dachaufbau 4 mit einer 1cm dicken Pflanzschicht (rot) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

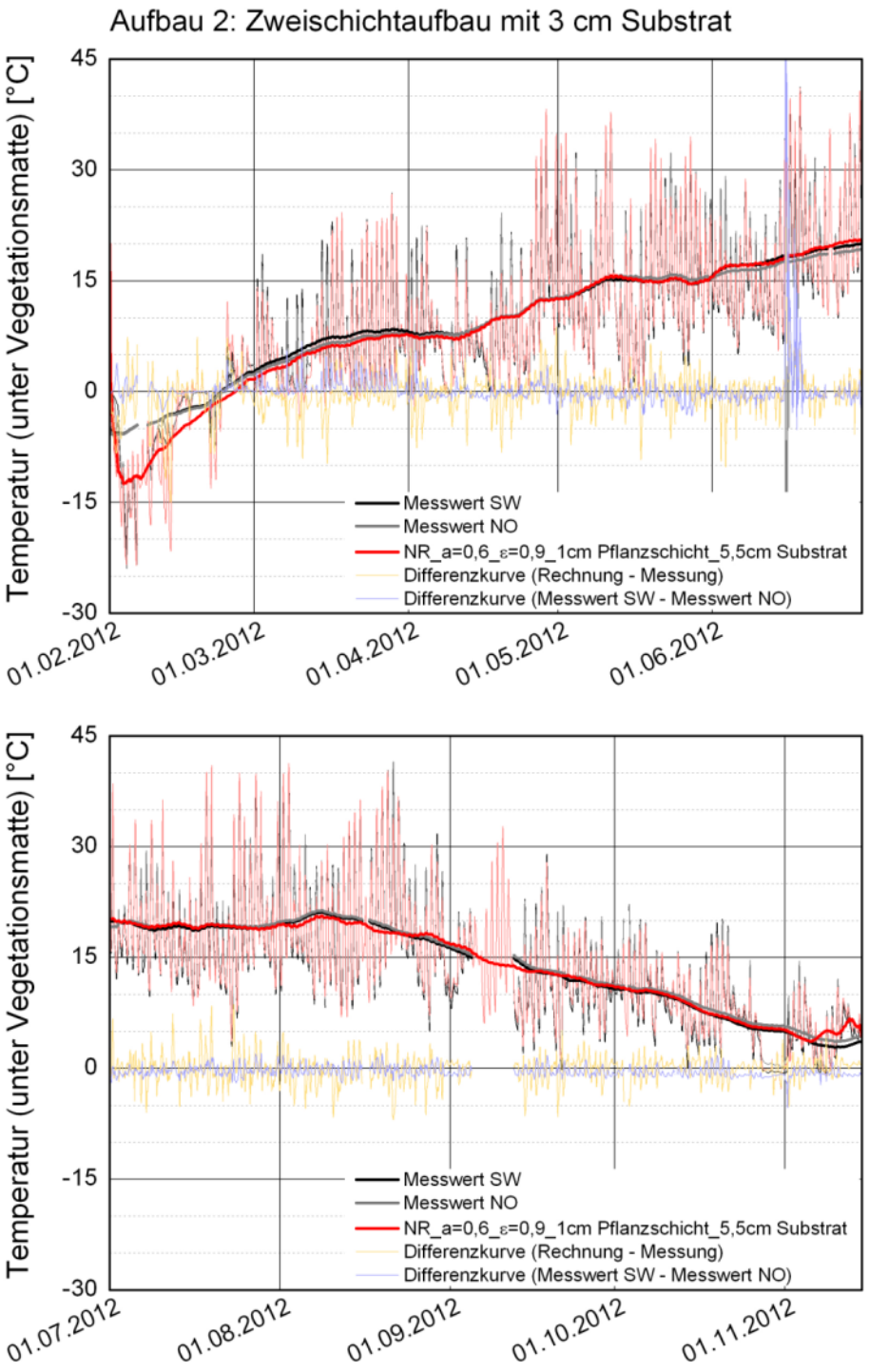


Bild 71:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter der Vegetationsmatte von Dachaufbau 2 mit einer 5,5 cm dicken Substratschicht (rot) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

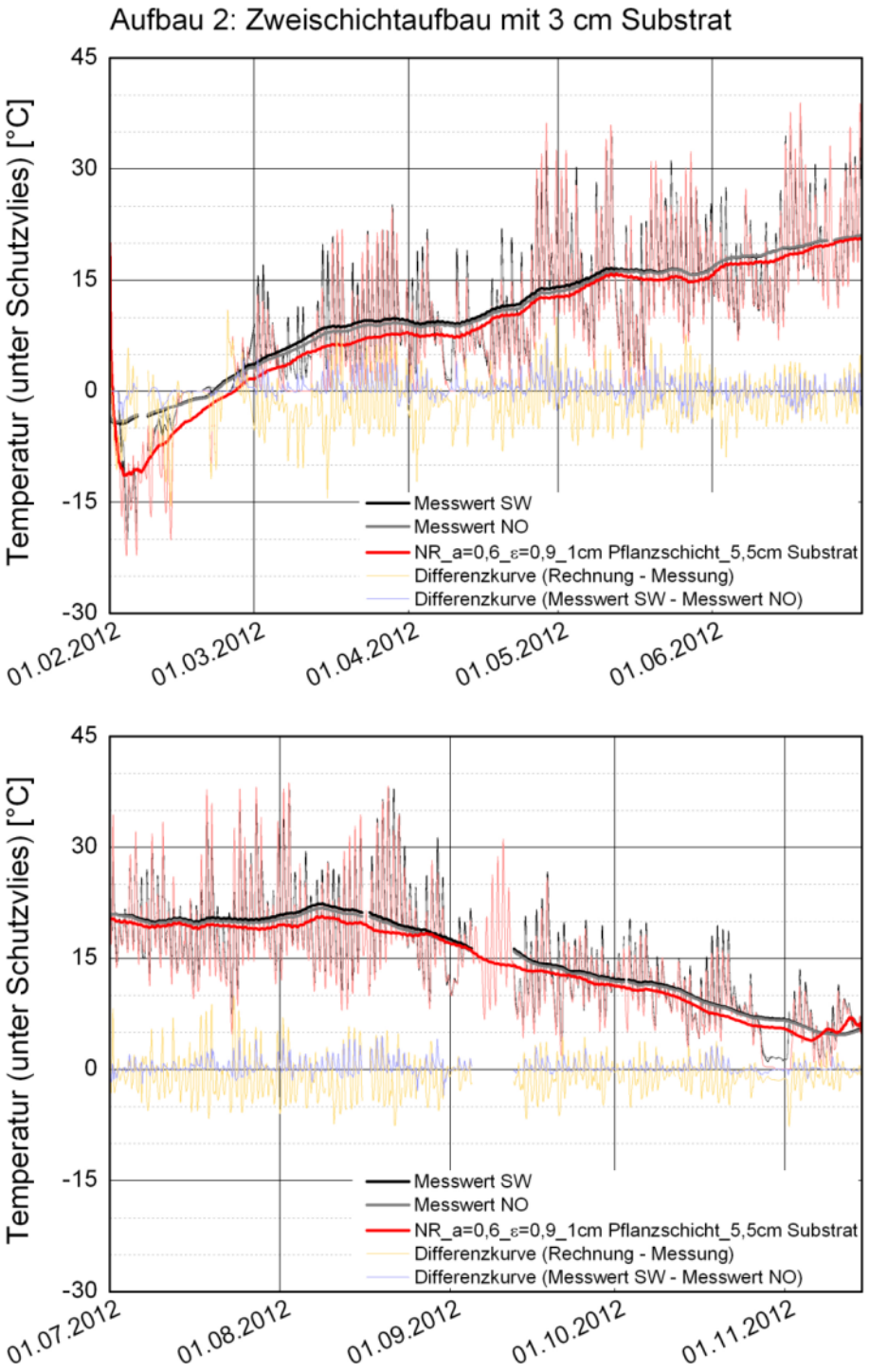


Bild 72:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter dem Schutz- und Speichervlies von Dachaufbau 2 mit einer 5,5 cm dicken Substratschicht (rot) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

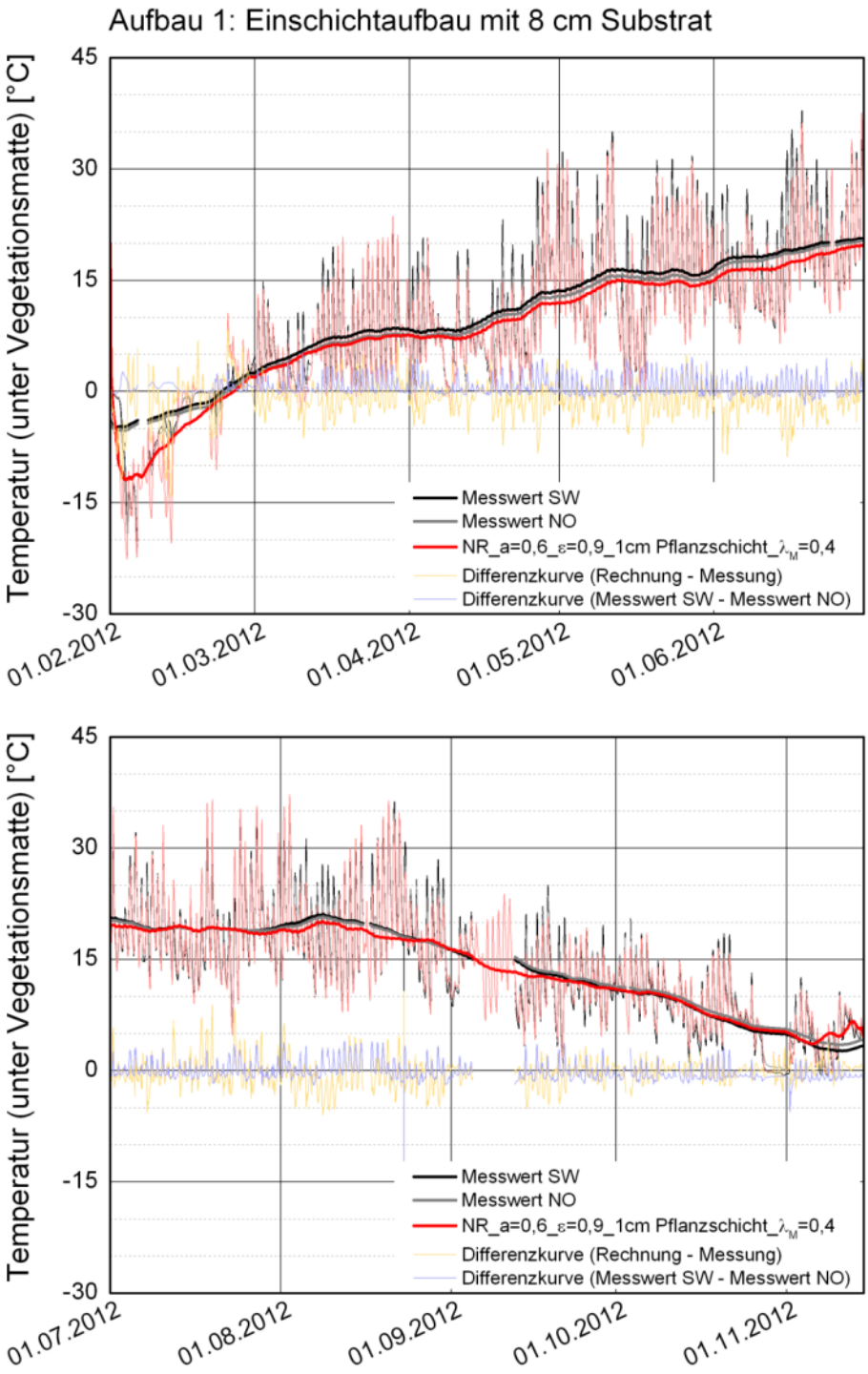


Bild 73:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter der Vegetationsmatte von Dachaufbau 1 mit einer kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl von 0,6 (rot) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

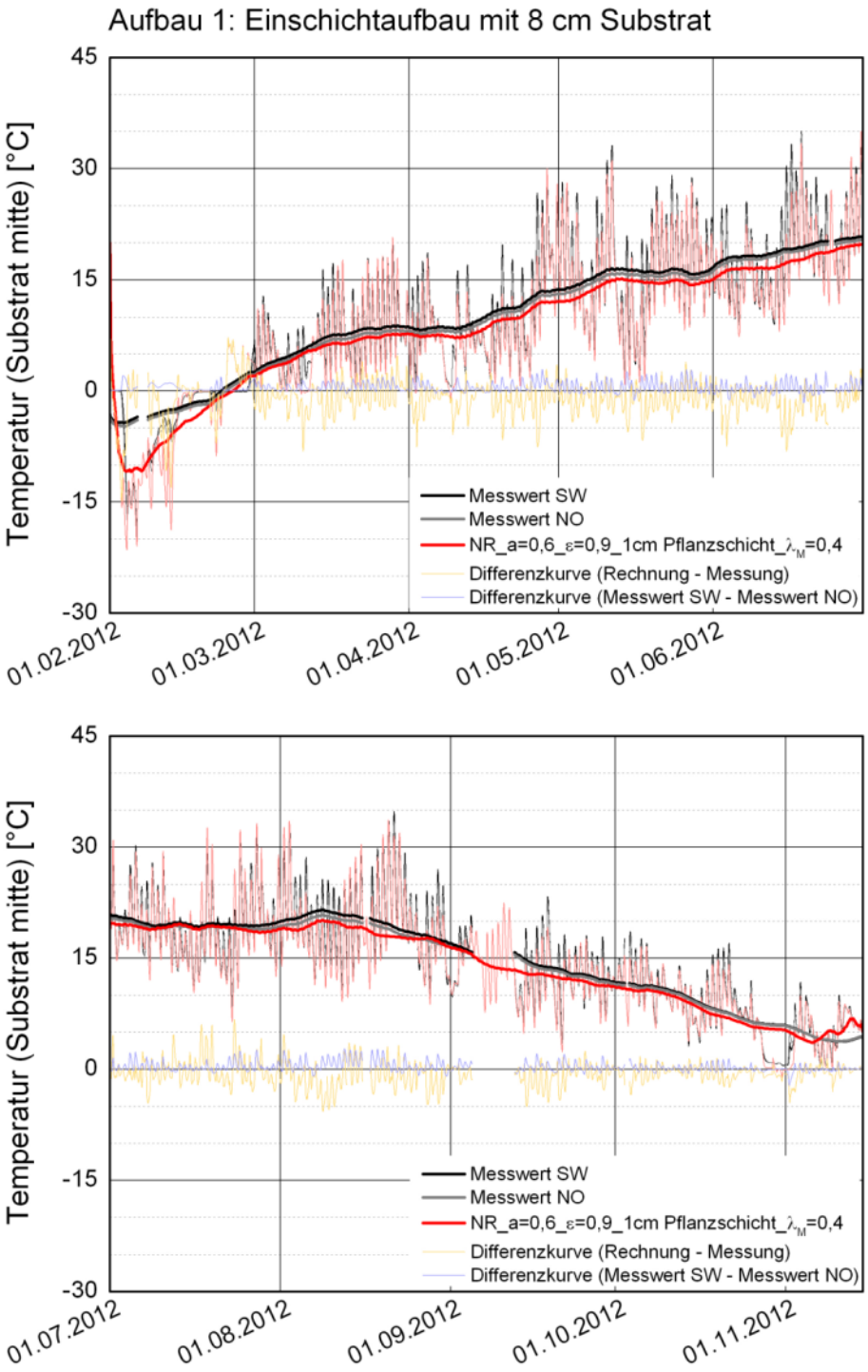


Bild 74:
Berechneter Verlauf der Temperaturen in Substratmitte von Dachaufbau 1 mit einer kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl von 0,6 (rot) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

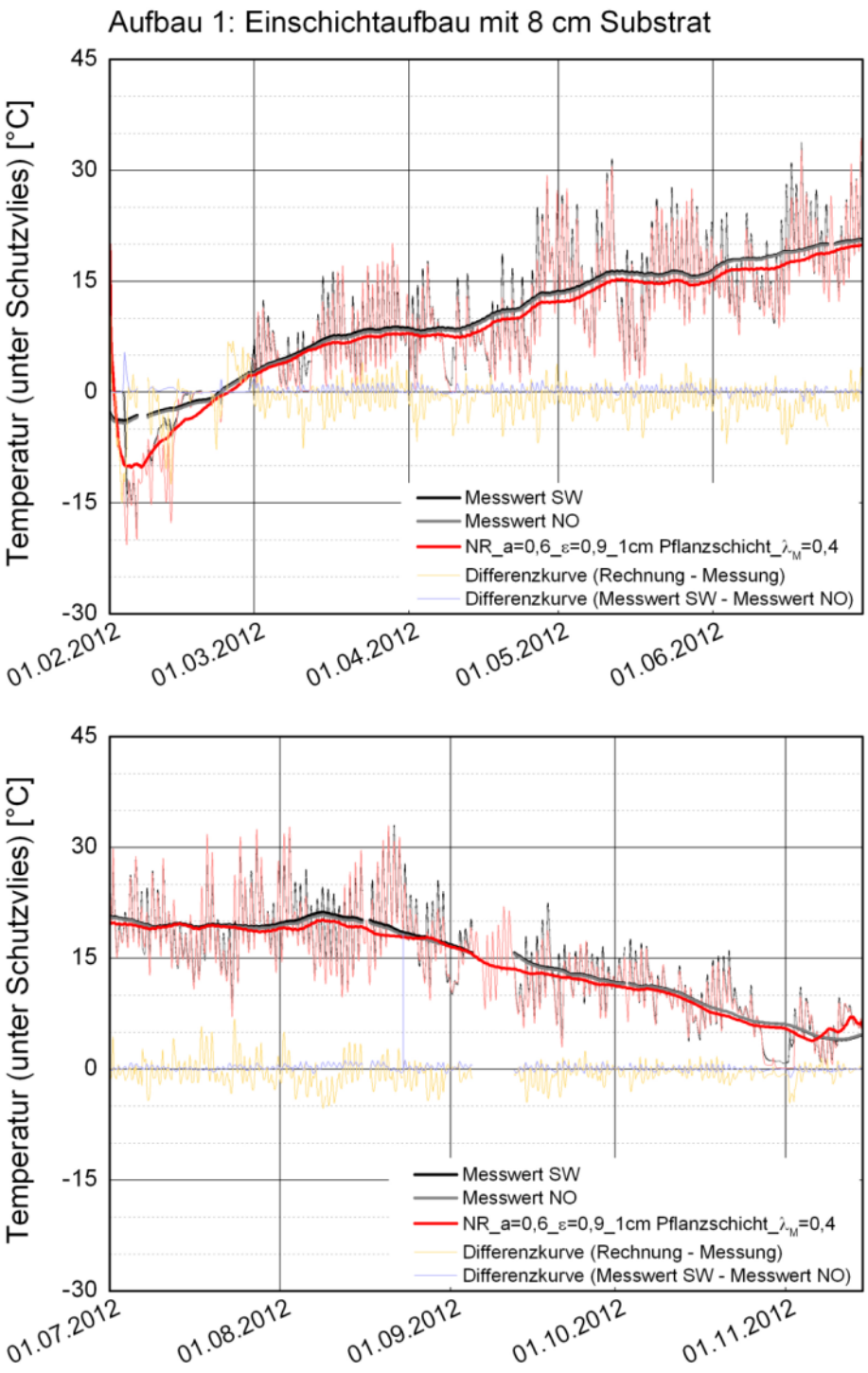


Bild 75:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter dem Schutz- und Speichervlies von Dachaufbau 1 mit einer kurzwelligen Strahlungsabsorptionszahl von 0,6 (rot) im Vergleich zu den beiden Messkurven (grau / schwarz). Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

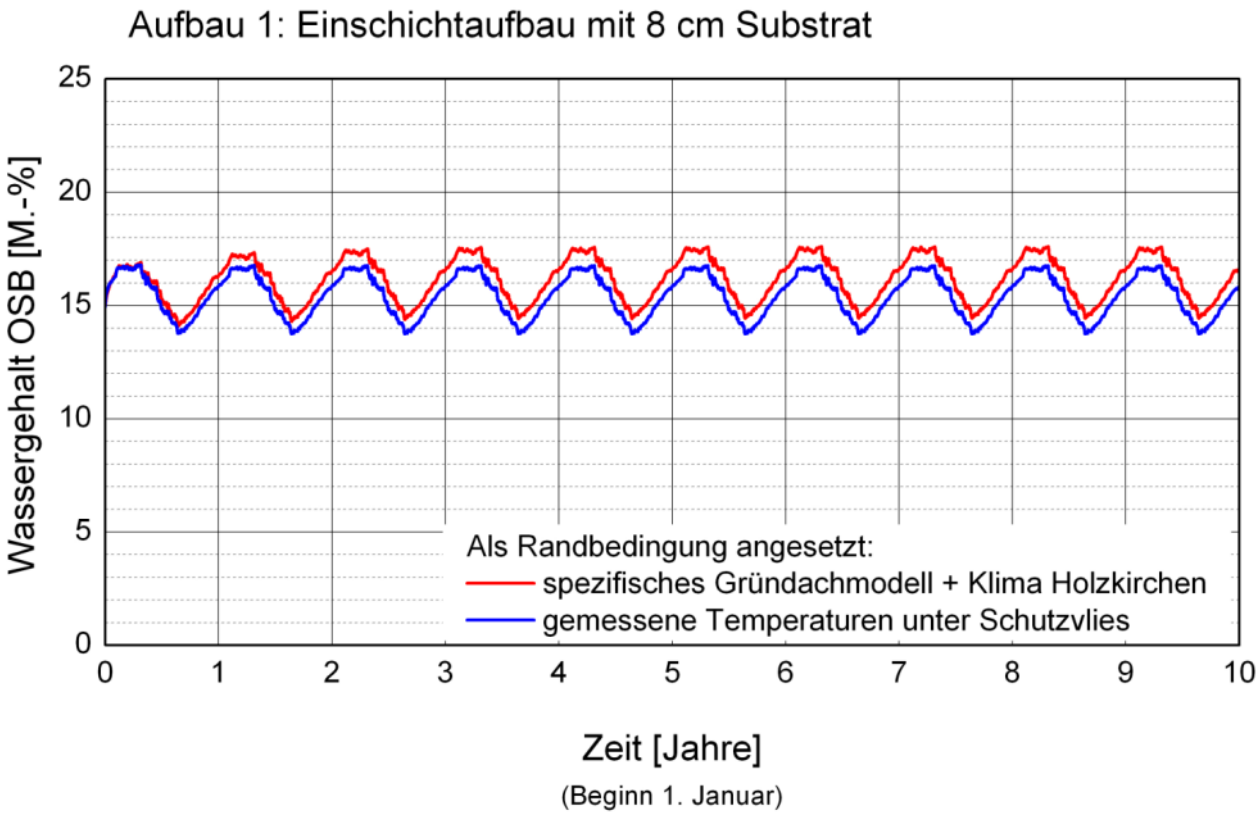


Bild 76:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion über den Berechnungszeitraum von 10 Jahren für den Dachaufbau 1 in Abhängigkeit vom verwendeten Berechnungsansatzes.

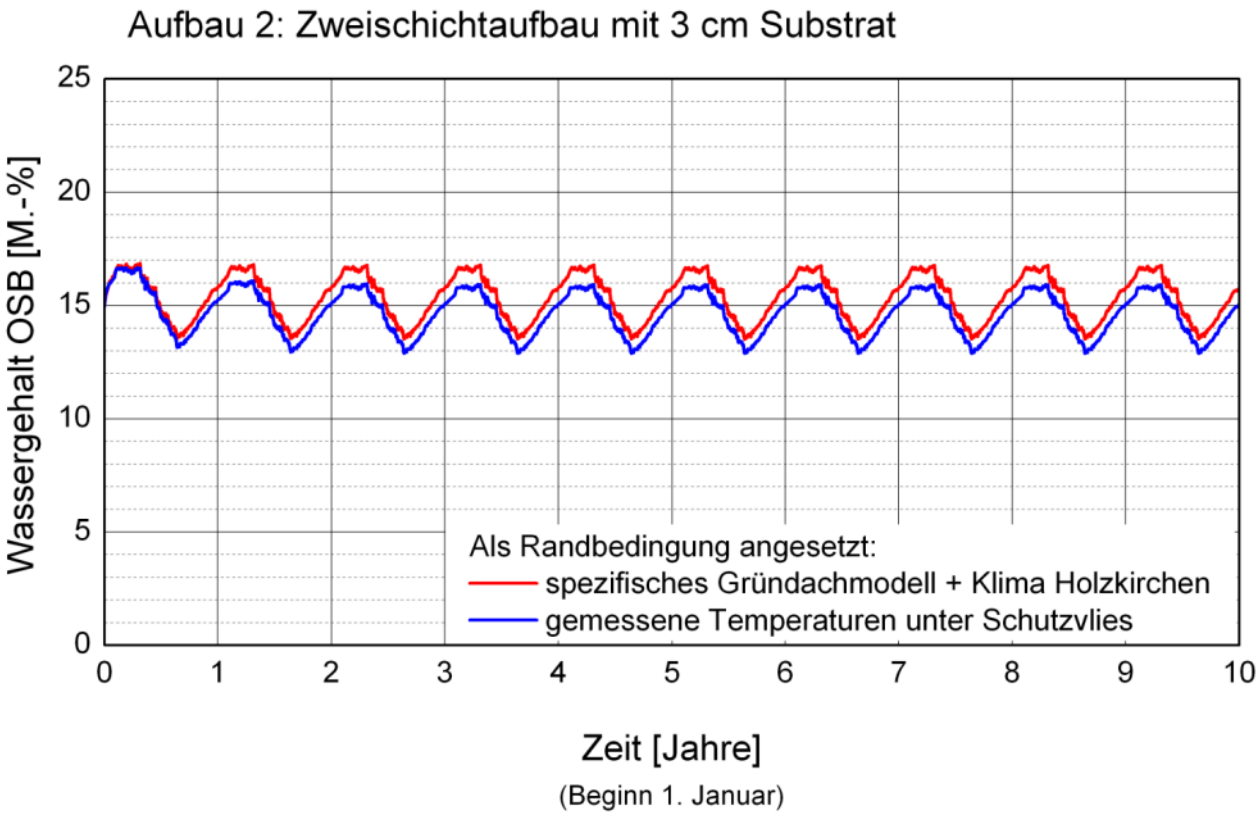


Bild 77:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion über den Berechnungszeitraum von 10 Jahren für den Dachaufbau 2 in Abhängigkeit vom verwendeten Berechnungsansatzes.

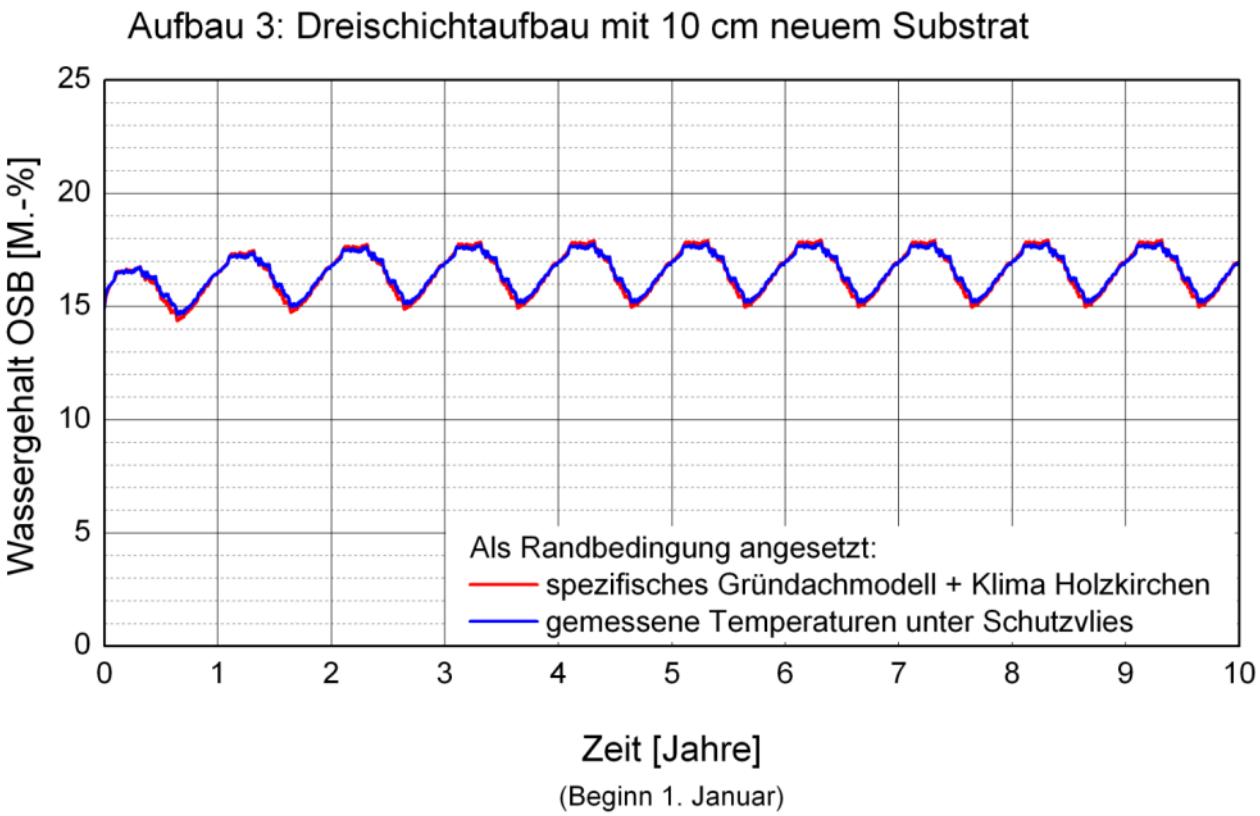


Bild 78:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion über den Berechnungszeitraum von 10 Jahren für den Dachaufbau 3 in Abhängigkeit vom verwendeten Berechnungsansatzes.

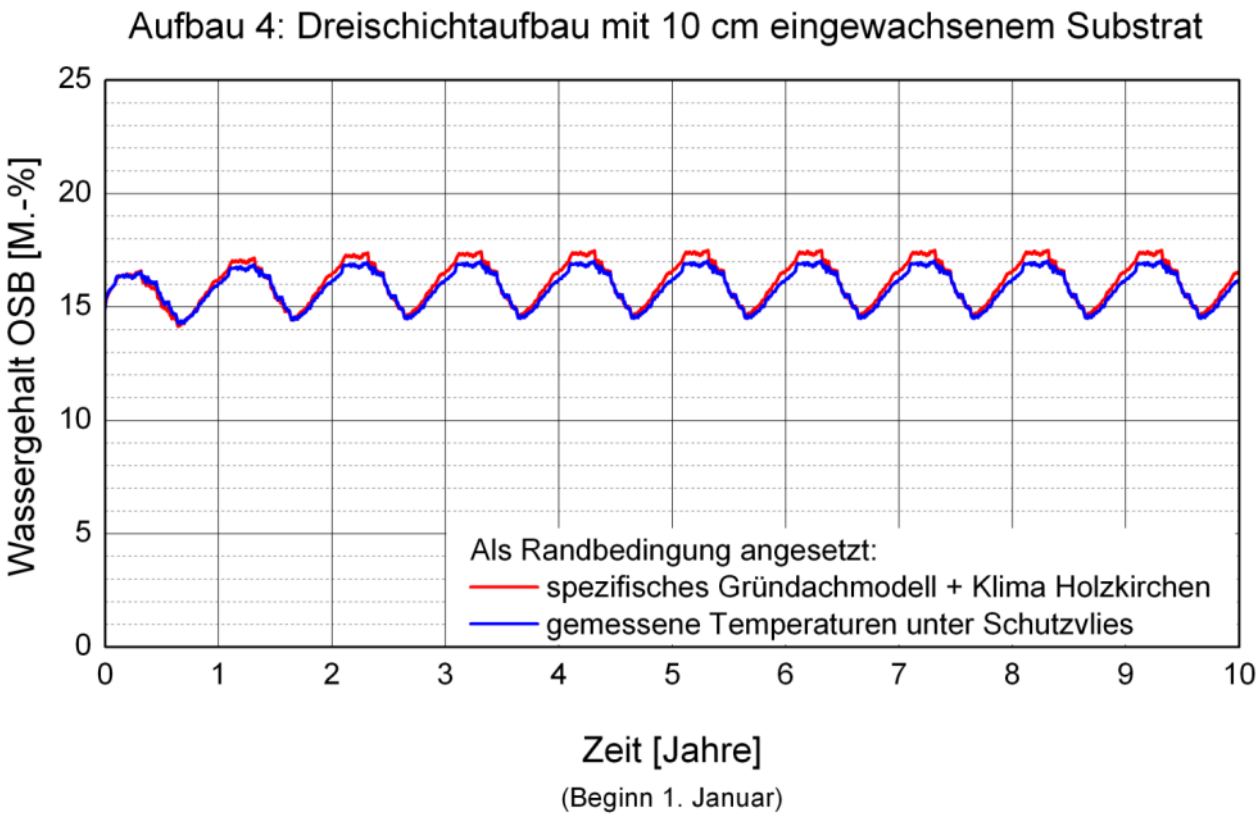


Bild 79:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion über den Berechnungszeitraum von 10 Jahren für den Dachaufbau 4 in Abhängigkeit vom verwendeten Berechnungsansatzes.

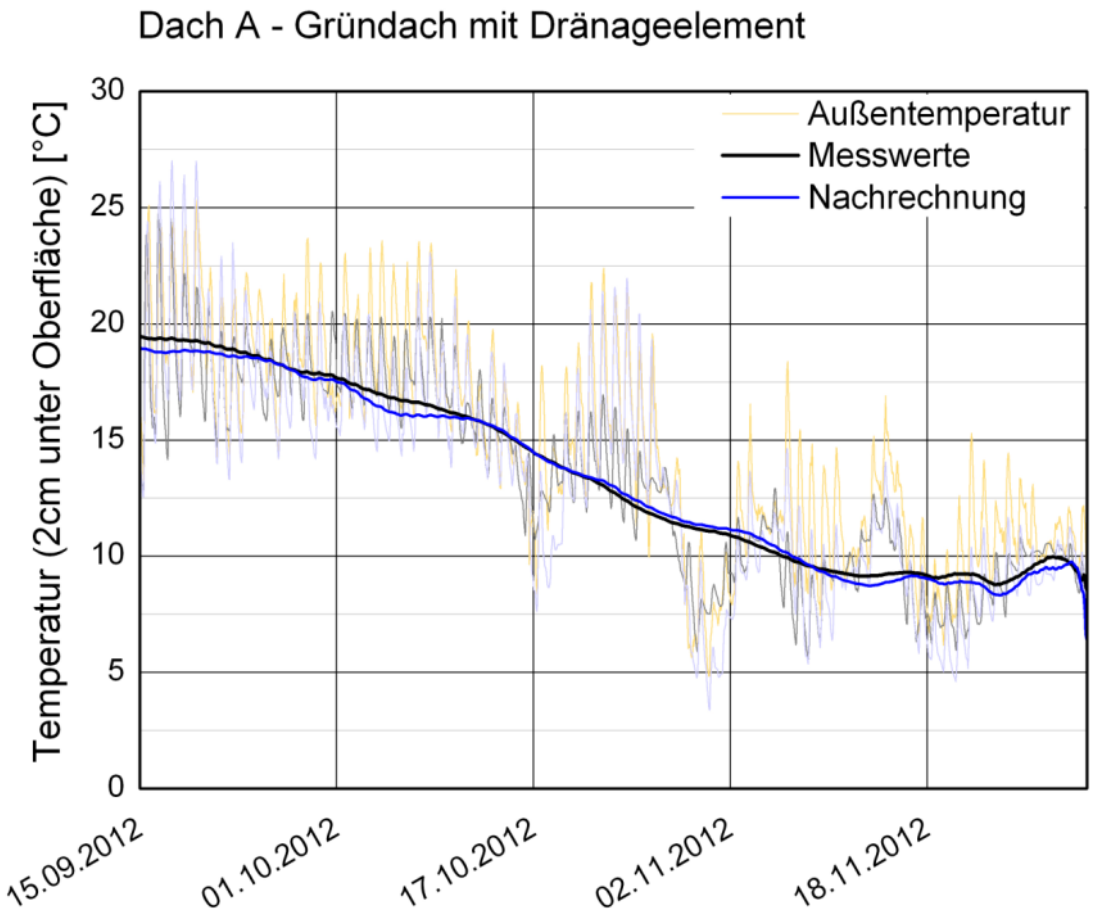


Bild 80:
Berechneter Verlauf der Temperaturen 2 cm unter der Oberfläche (blau) von Dach A am Standort Mailand im Vergleich zur Messkurve (schwarz) und zur Außenlufttemperatur (gelb) über den Zeitraum vom 15. September bis 30. November 2012. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

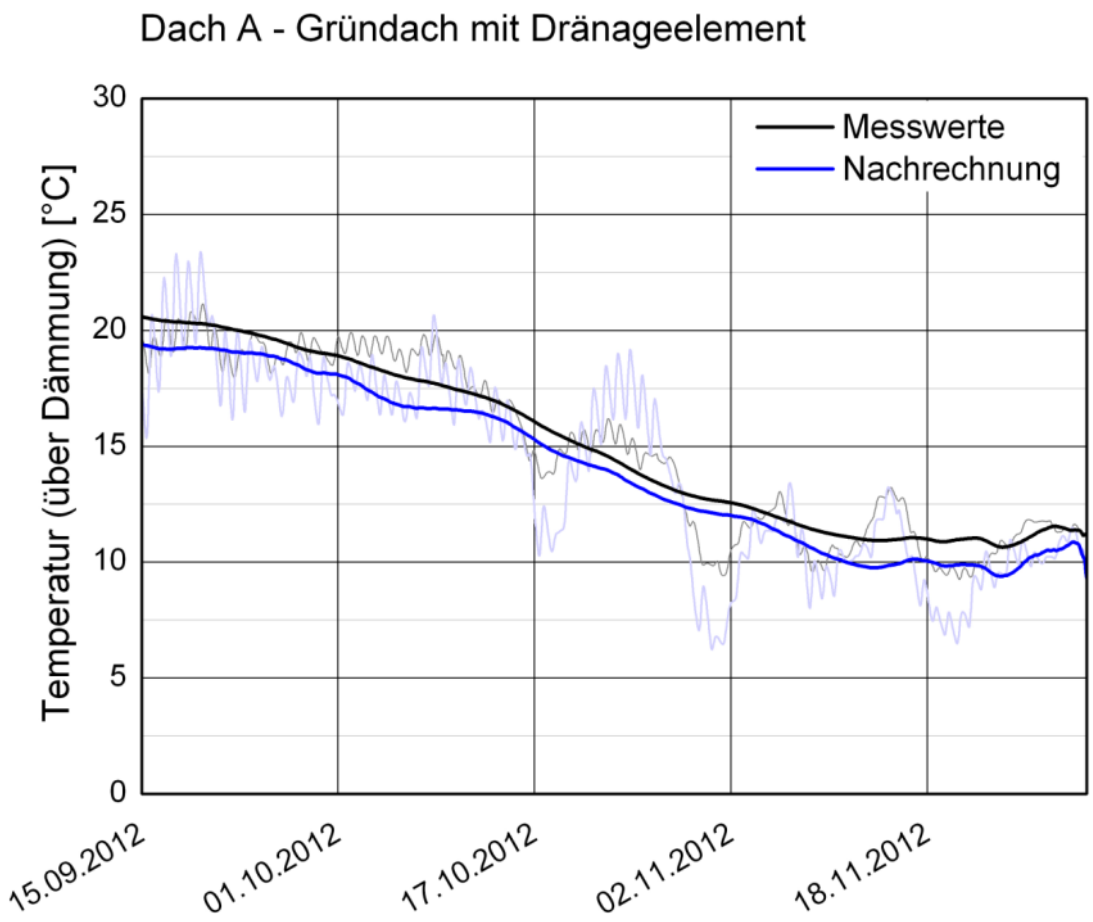


Bild 81:
Berechneter Verlauf der Temperaturen über der XPS-Dämmung (blau) von Dach A am Standort Mailand im Vergleich zur Messkurve (schwarz) über den Zeitraum vom 15. September bis 30. November 2012. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

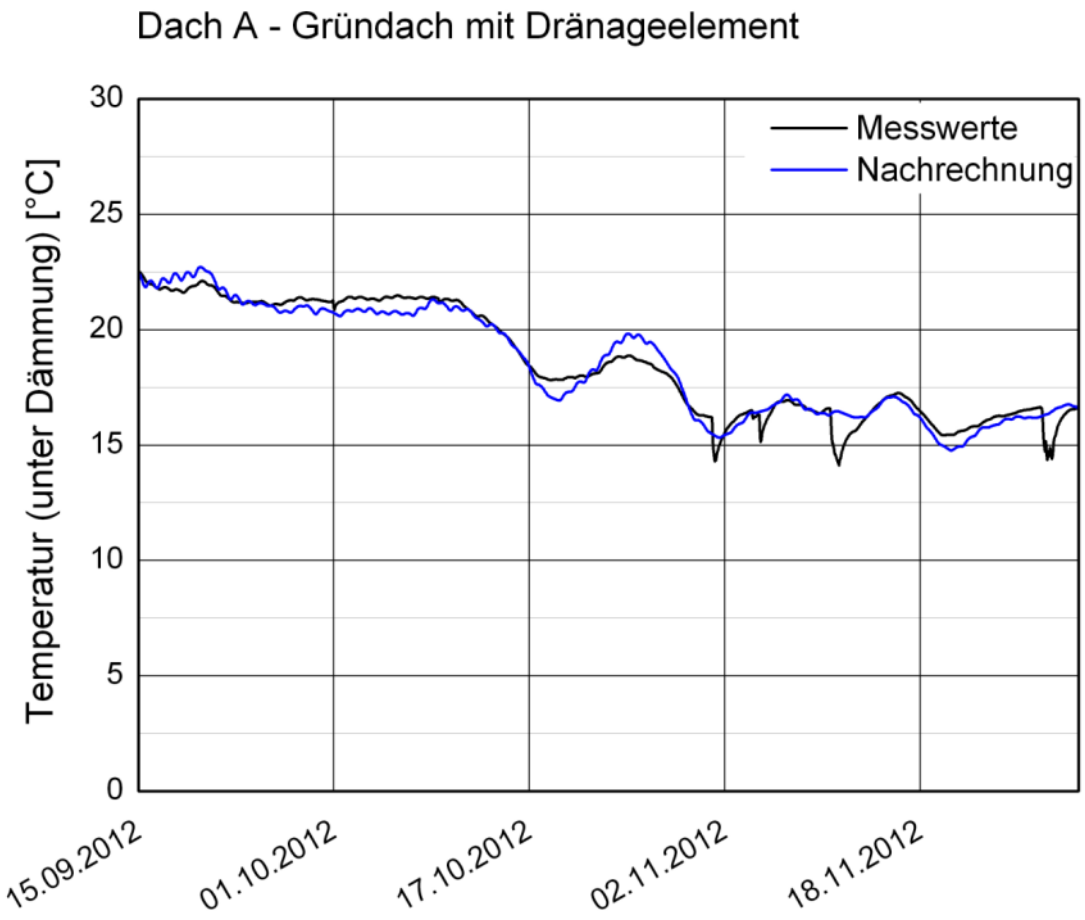


Bild 82:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter der XPS-Dämmung (blau) von Dach A am Standort Mailand im Vergleich zur Messkurve (schwarz) über den Zeitraum vom 15. September bis 30. November 2012.

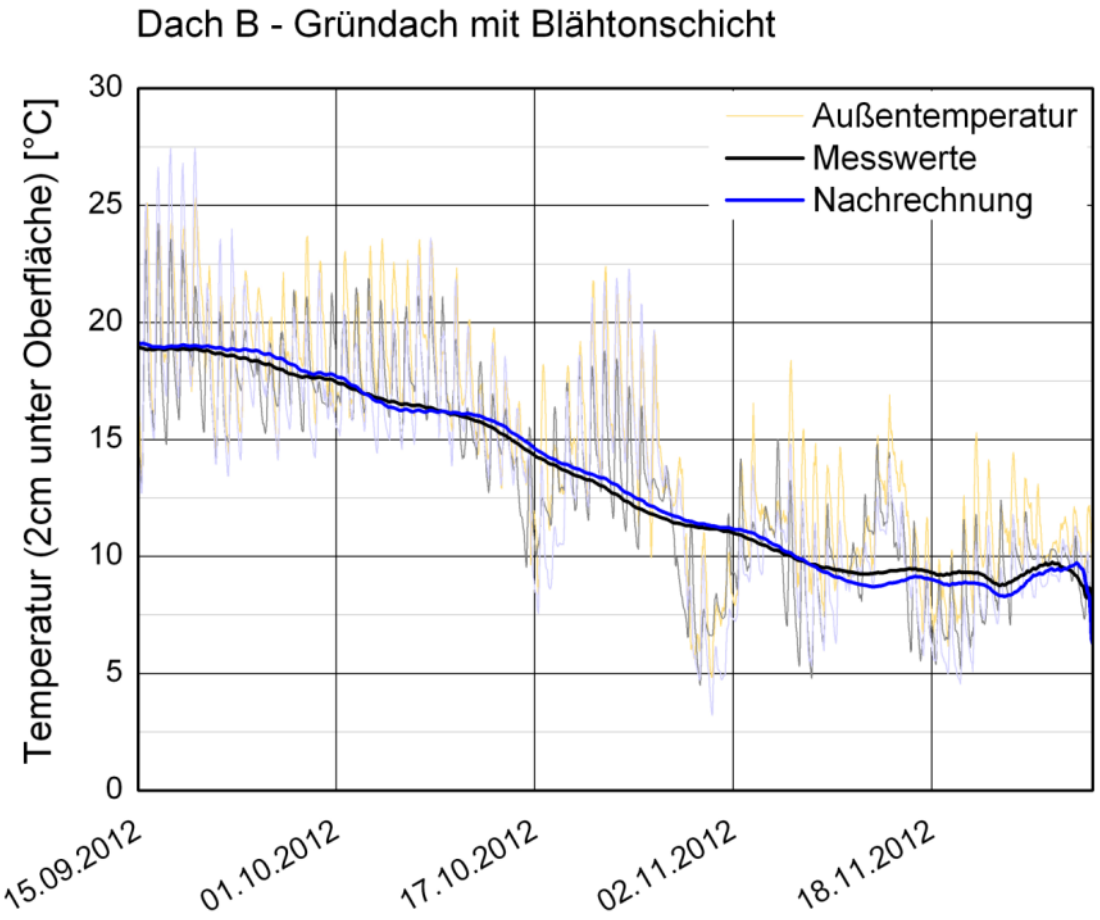


Bild 83:
Berechneter Verlauf der Temperaturen 2 cm unter der Oberfläche (blau) von Dach B am Standort Mailand im Vergleich zur Messkurve (schwarz) und zur Außenlufttemperatur (gelb) über den Zeitraum vom 15. September bis 30. November 2012. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

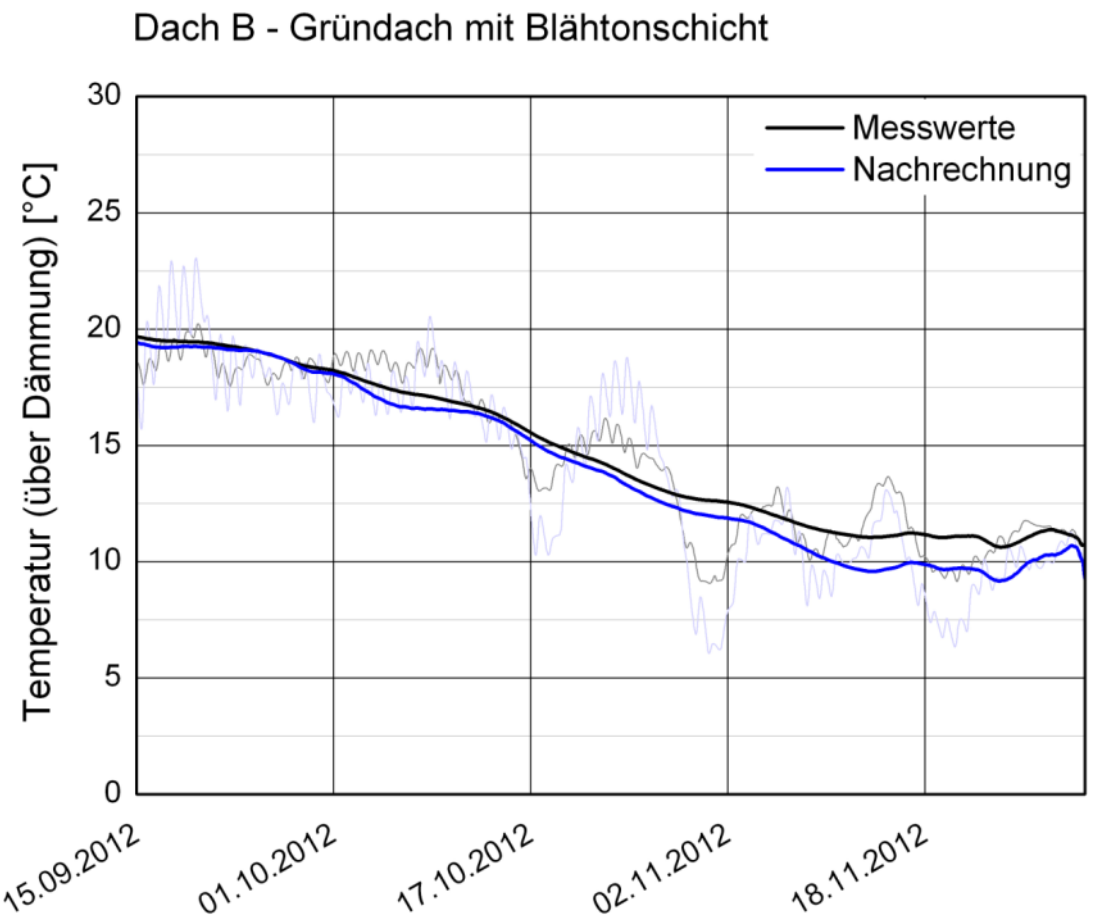


Bild 84:
Berechneter Verlauf der Temperaturen über der XPS-Dämmung (blau) von Dach B am Standort Mailand im Vergleich zur Messkurve (schwarz) über den Zeitraum vom 15. September bis 30. November 2012. Die hellen Kurven stellen die stündlichen Werte dar, die dunklen Kurven das gleitende Monatsmittel.

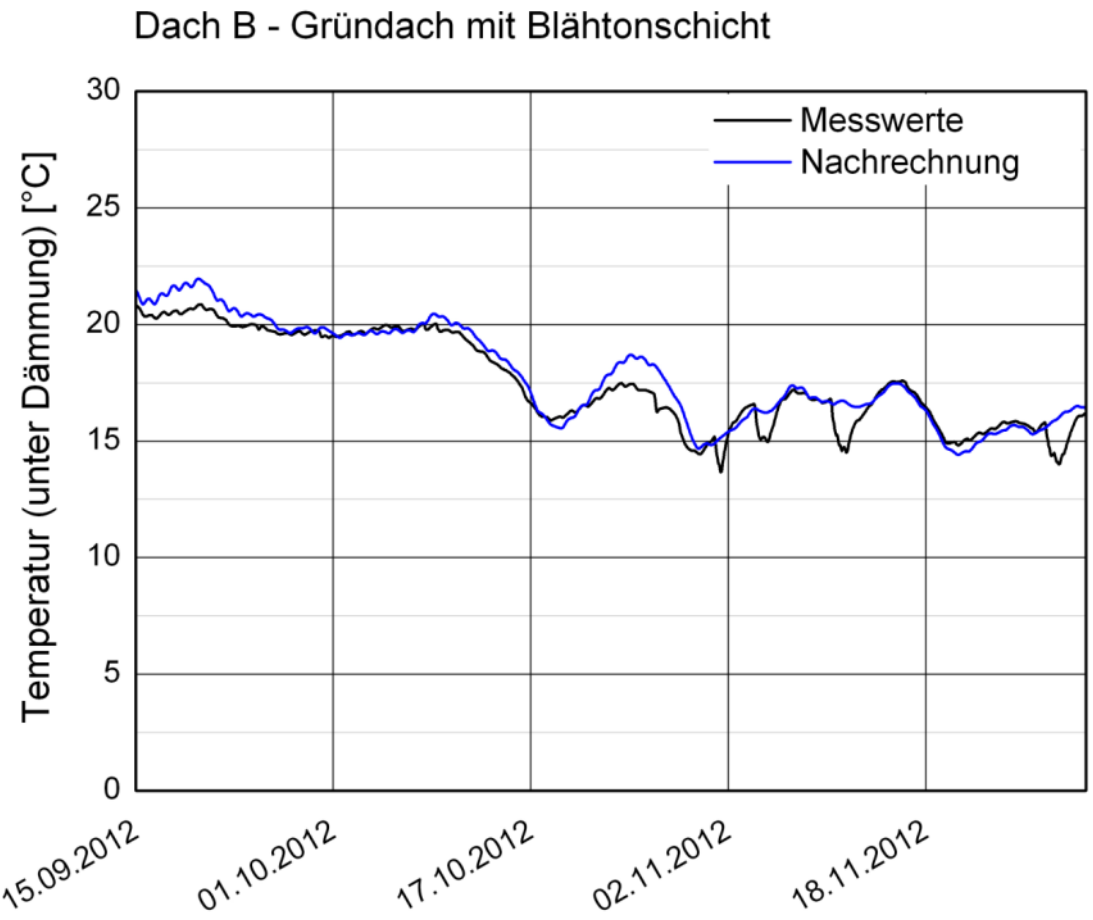


Bild 85:
Berechneter Verlauf der Temperaturen unter der XPS-Dämmung (blau) von Dach B am Standort Mailand im Vergleich zur Messkurve (schwarz) über den Zeitraum vom 15. September bis 30. November 2012.

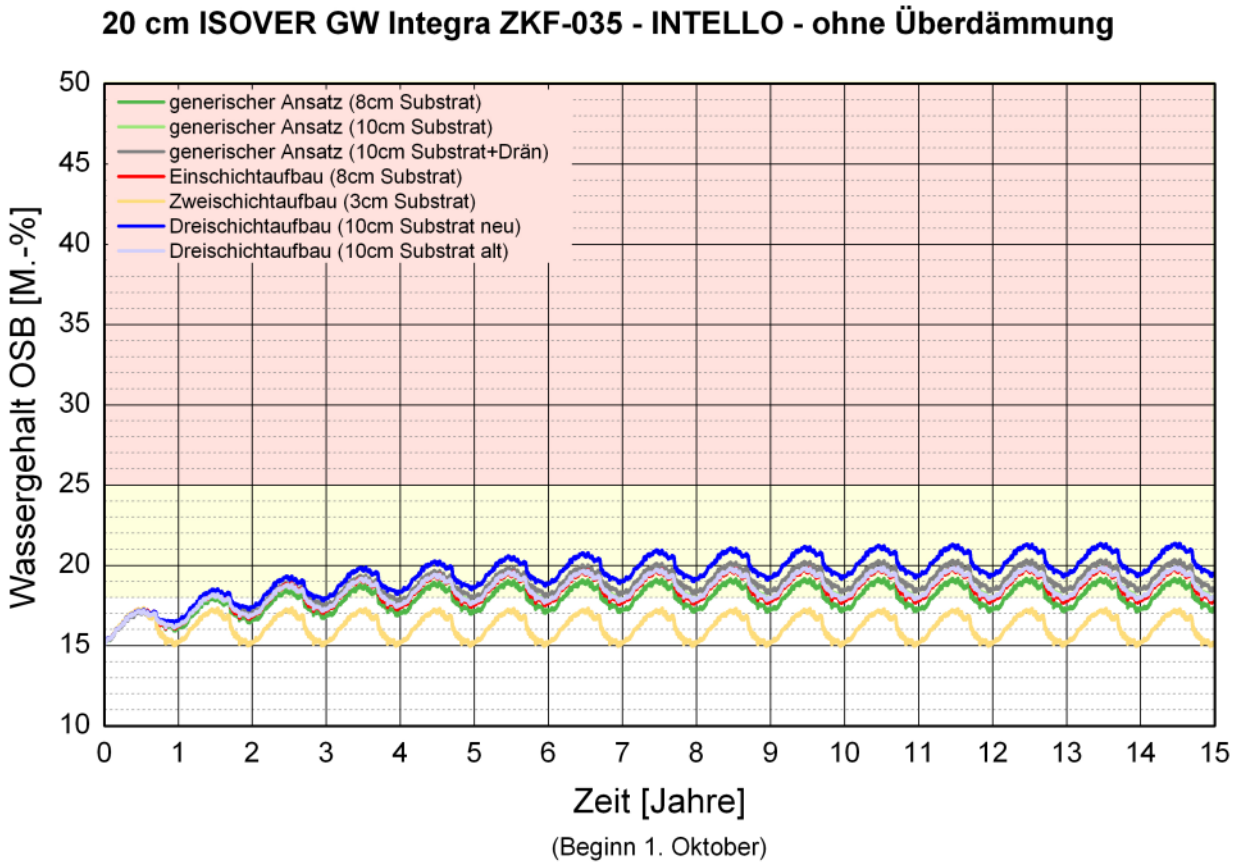


Bild 86:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 20 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“ und raumseitiger „INTELLO“ ohne Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

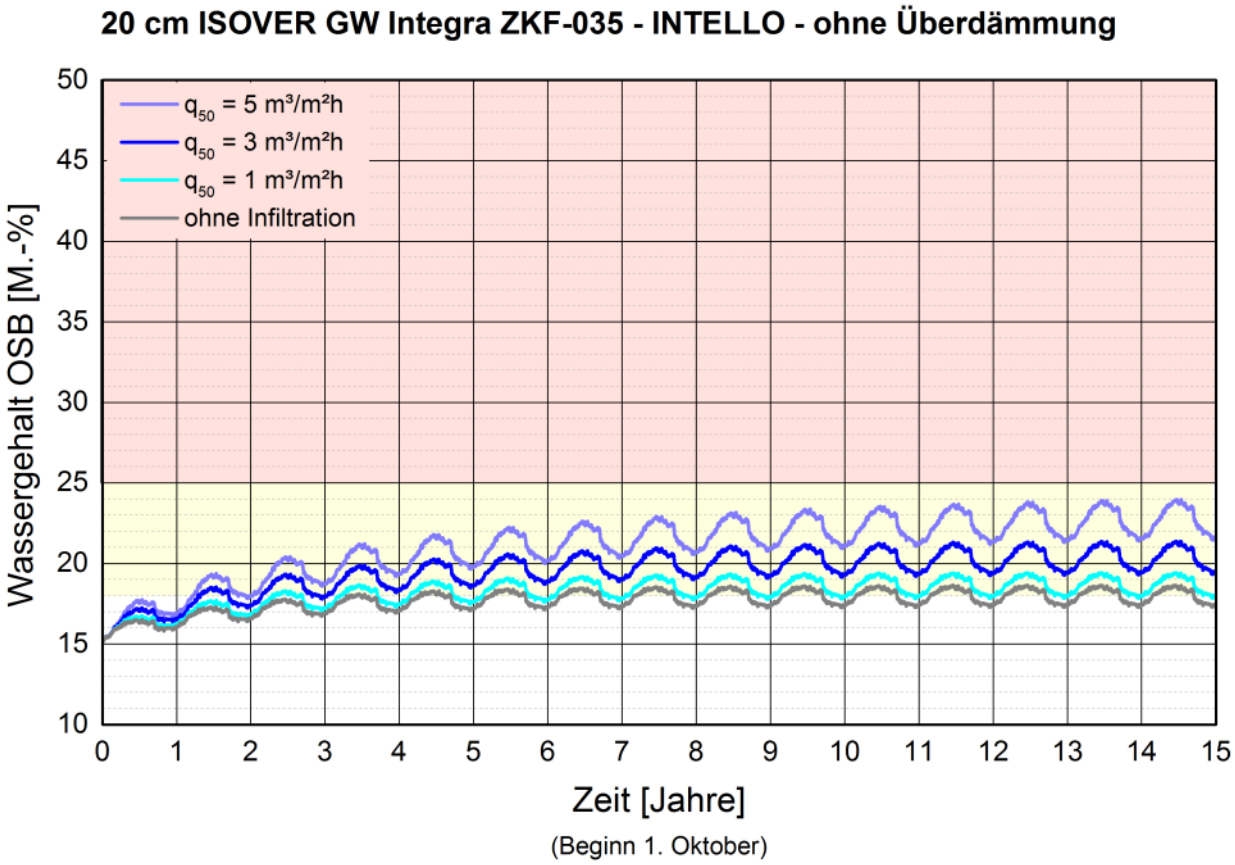


Bild 87:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte für den Dreischichtaufbau (10cm Substrat, neu) und einer Leichtbaukonstruktion mit 20 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“ und raumseitiger „INTELLO“ ohne Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Luftdichtheitsniveaus.

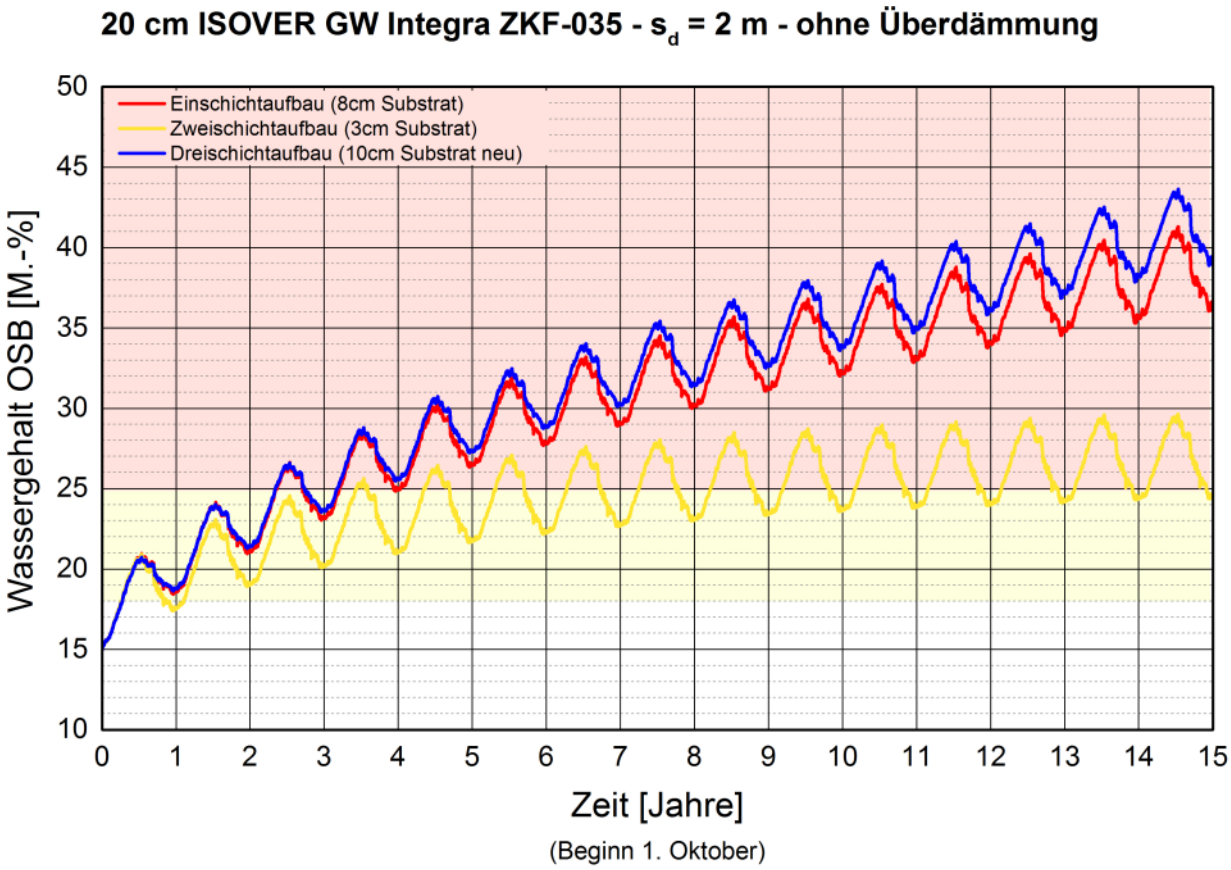


Bild 88:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 20 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“ und raumseitigem s_d-Wert von konstant 2 m ohne Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

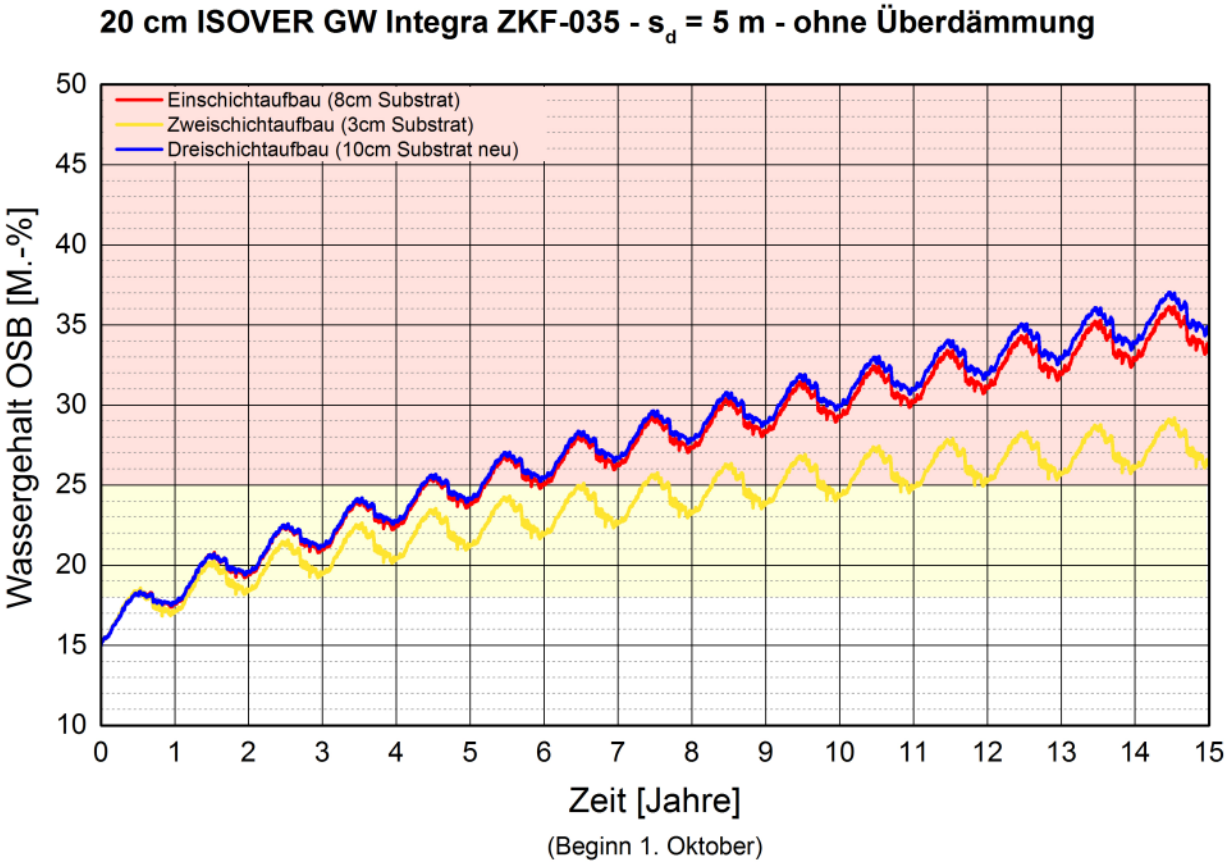


Bild 89:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 20 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“ und raumseitigem s_d-Wert von konstant 5 m ohne Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

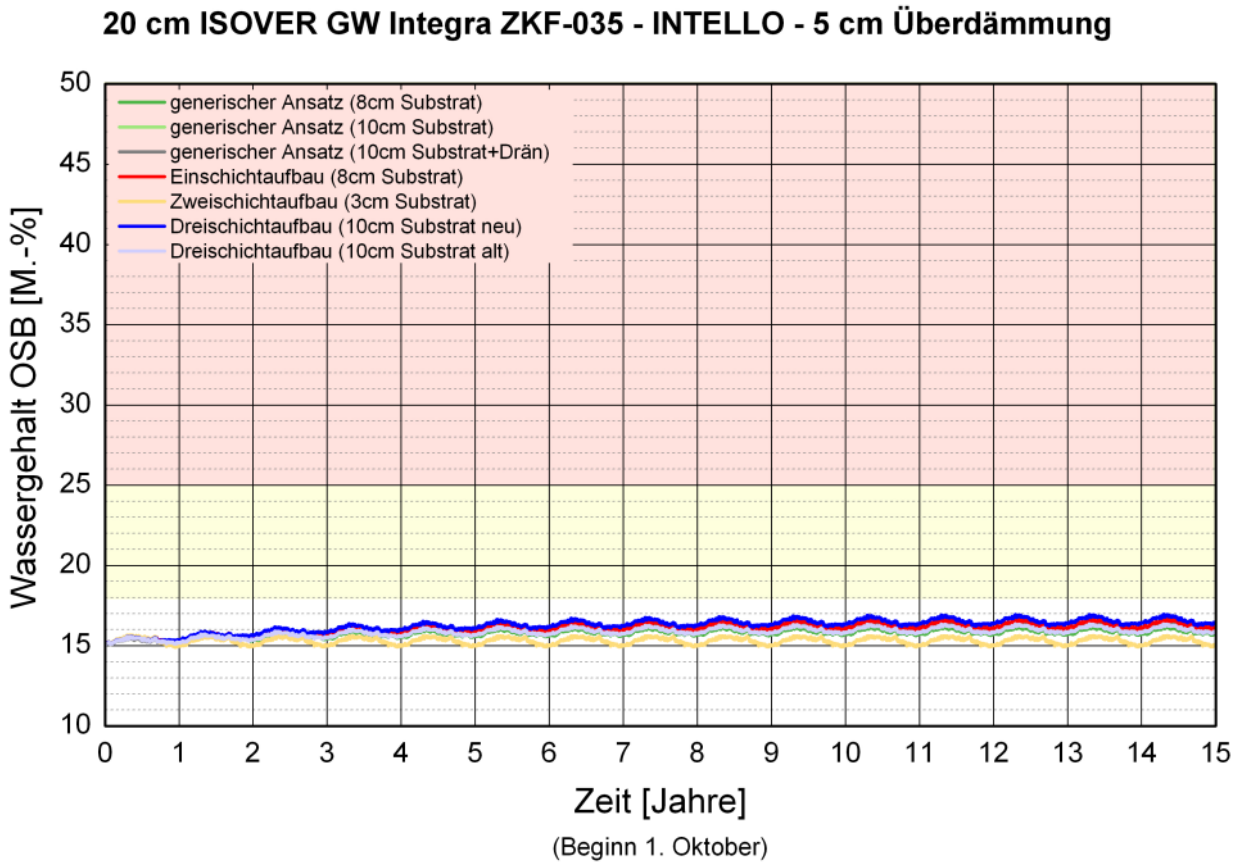


Bild 90:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 20 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“, raumseitiger „INTELLO“ und 5 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

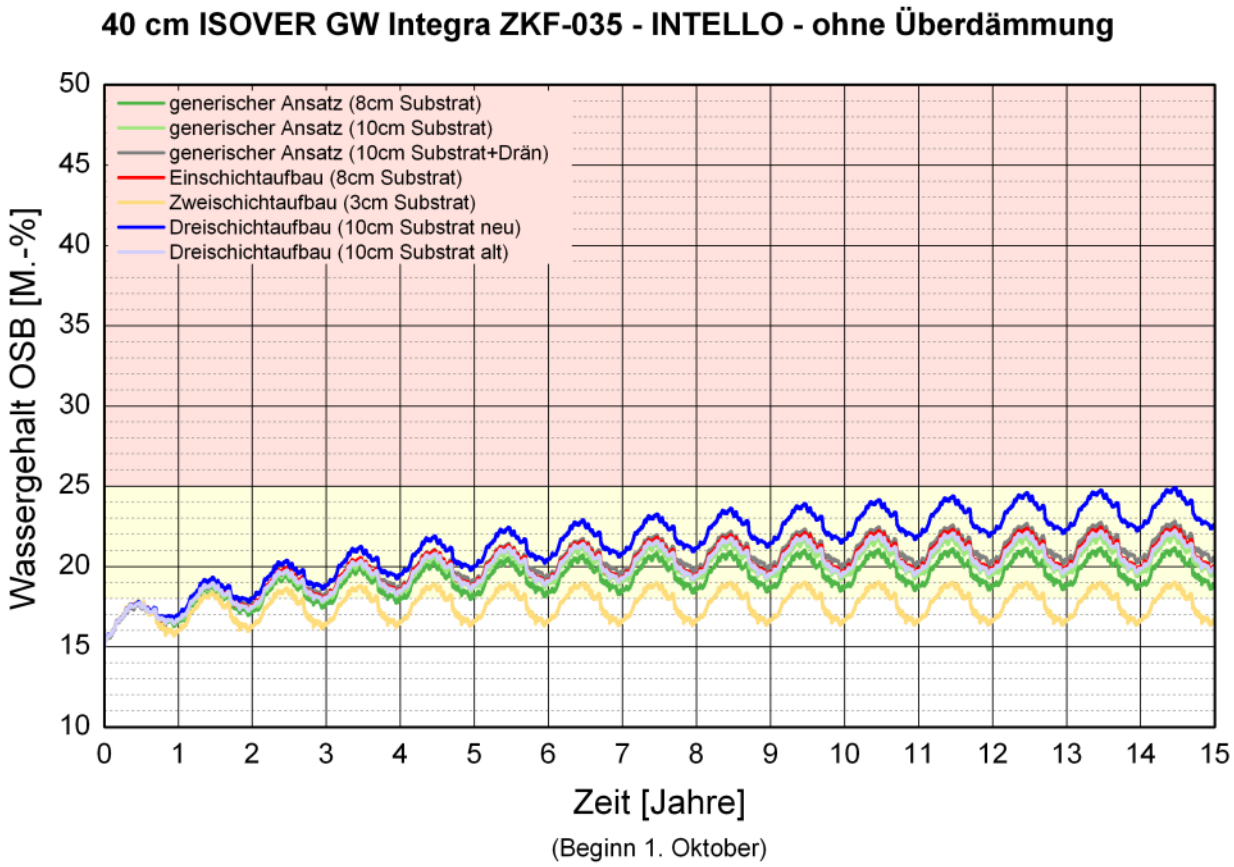


Bild 91:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“ und raumseitiger „INTELLO“ ohne Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

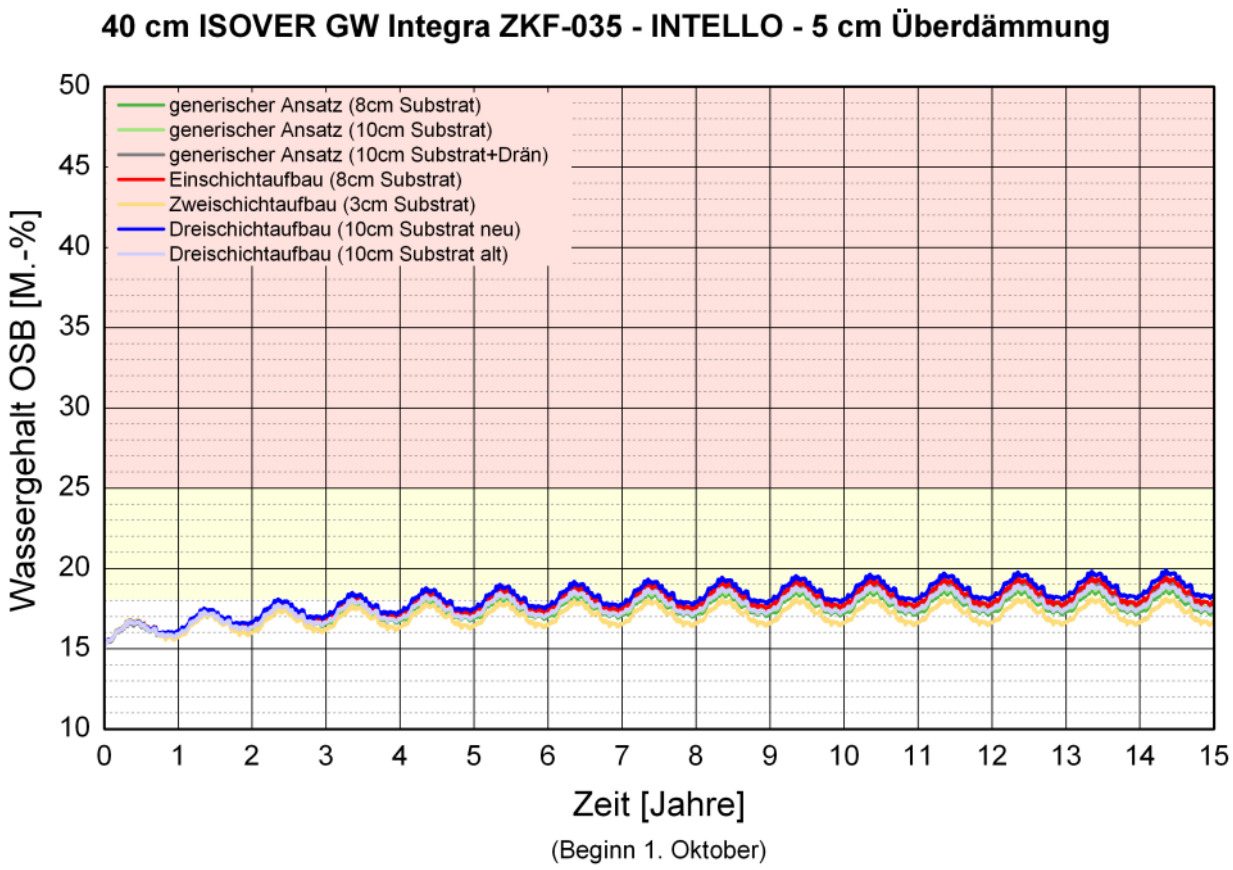


Bild 92:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“, raumseitiger „INTELLO“ und 5 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

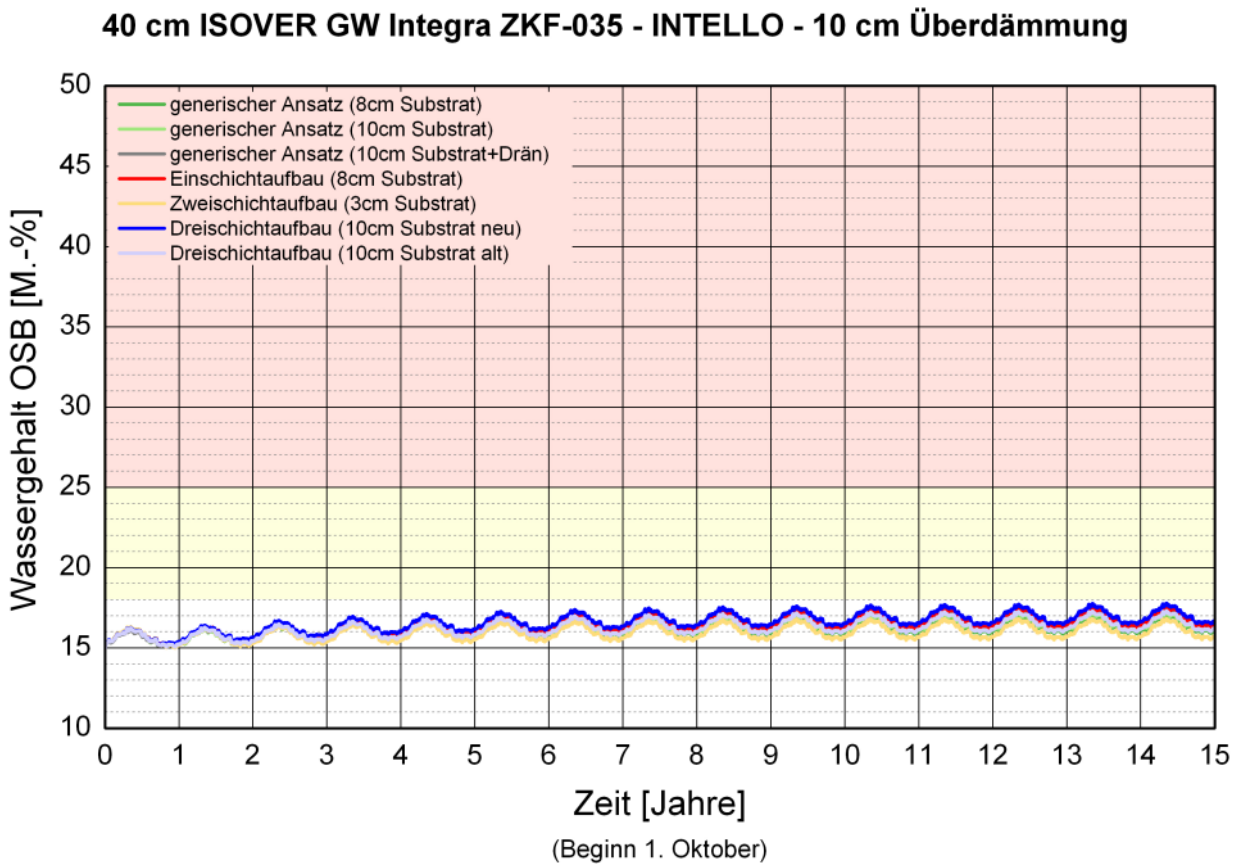


Bild 93:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“, raumseitiger „INTELLO“ und 10 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

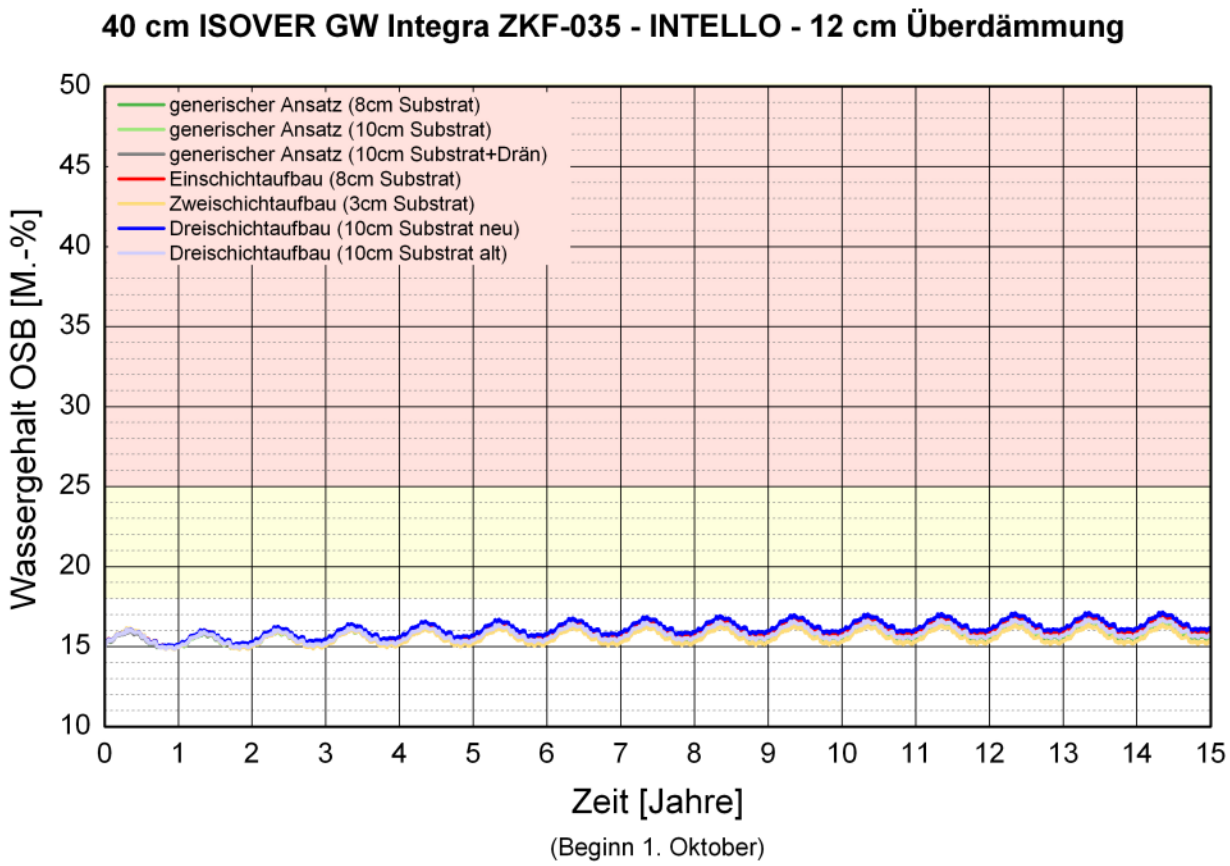


Bild 94:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“, raumseitiger „INTELLO“ und 12 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

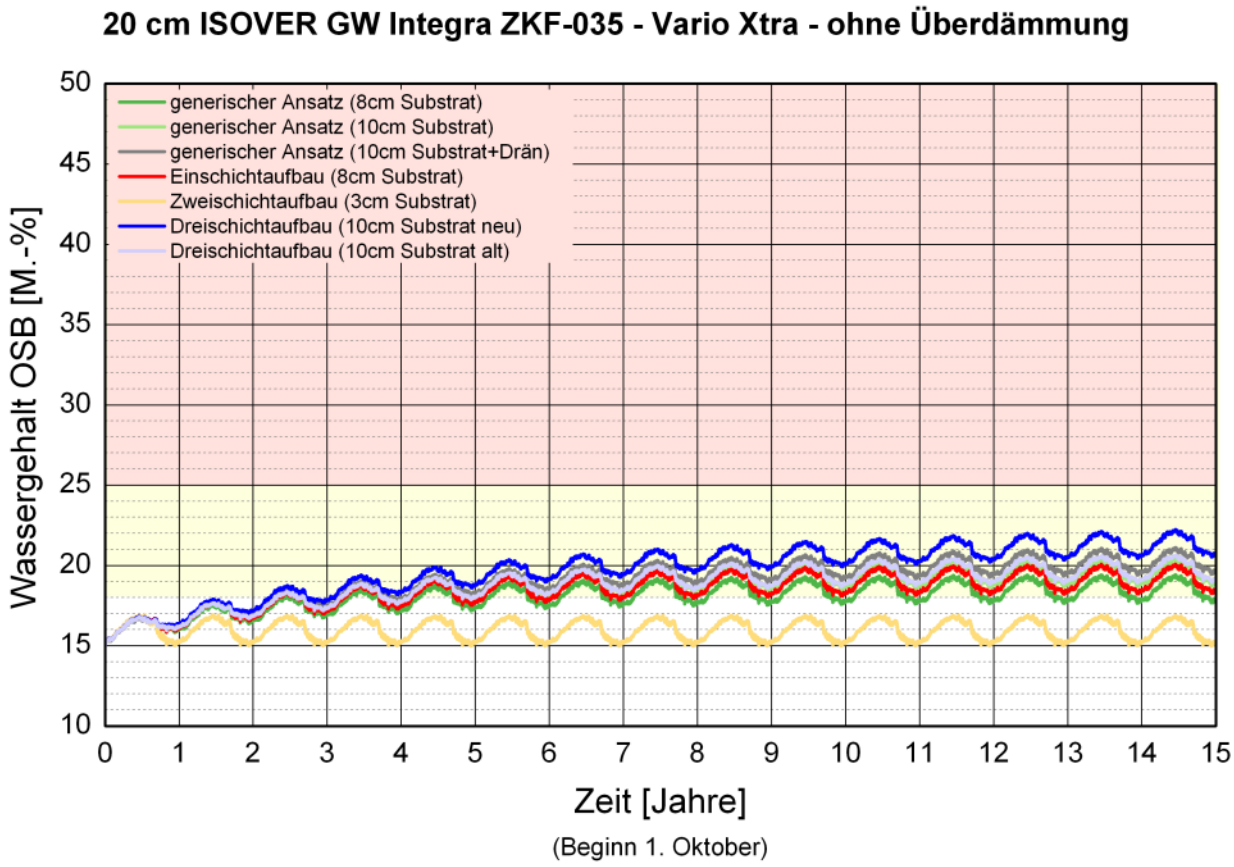


Bild 95:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 20 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“und raumseitiger „Vario Xtra“ ohne Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

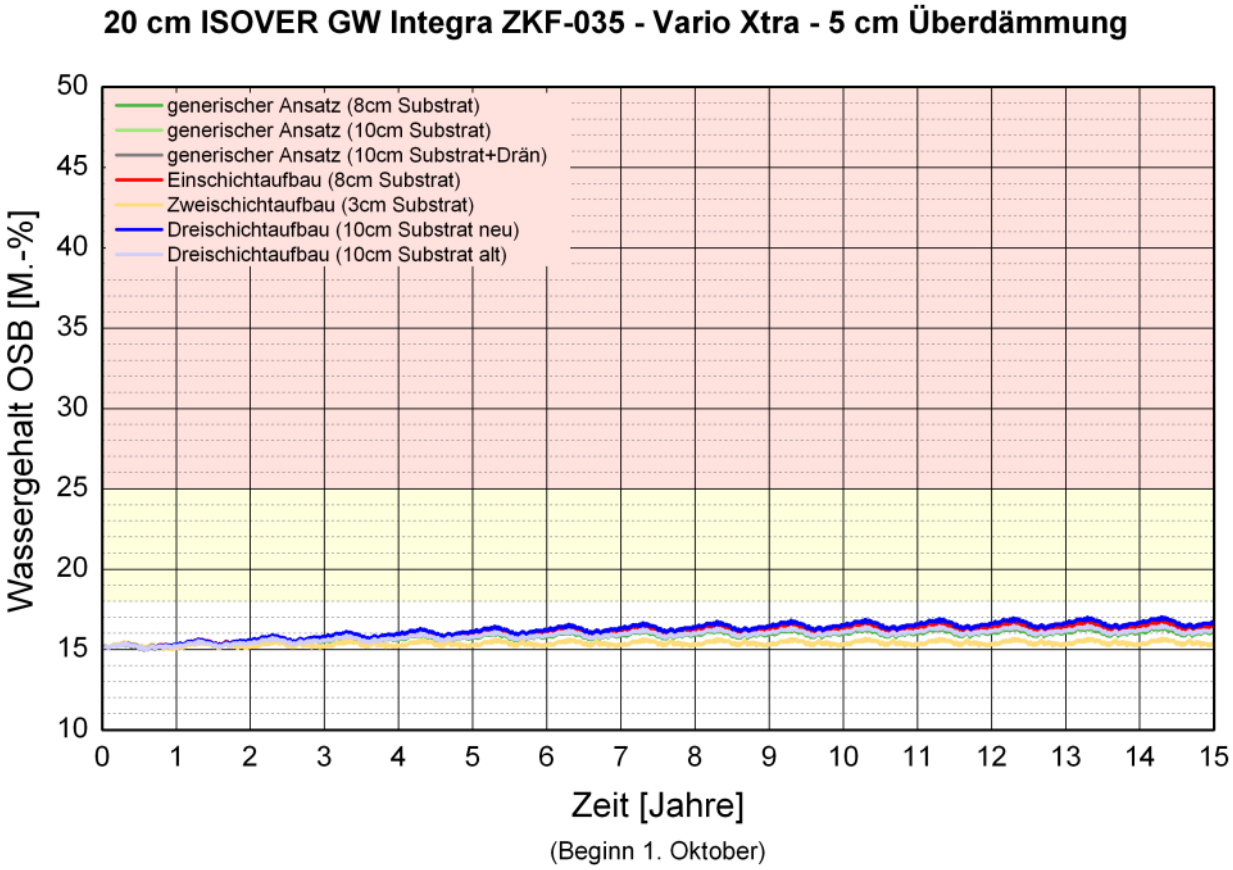


Bild 96:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 20 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“, raumseitiger „Vario Xtra“ und 5 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

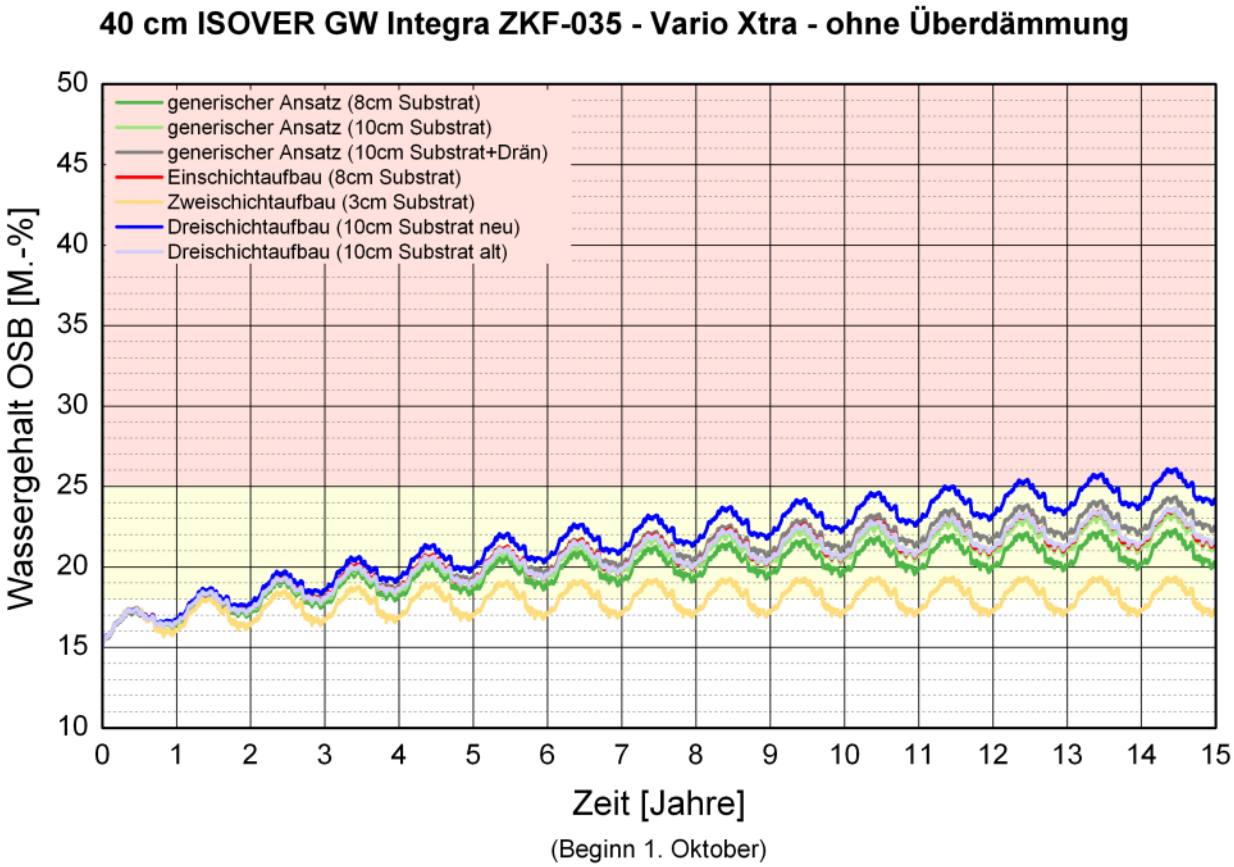


Bild 97:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“ und raumseitiger „Vario Xtra“ ohne Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

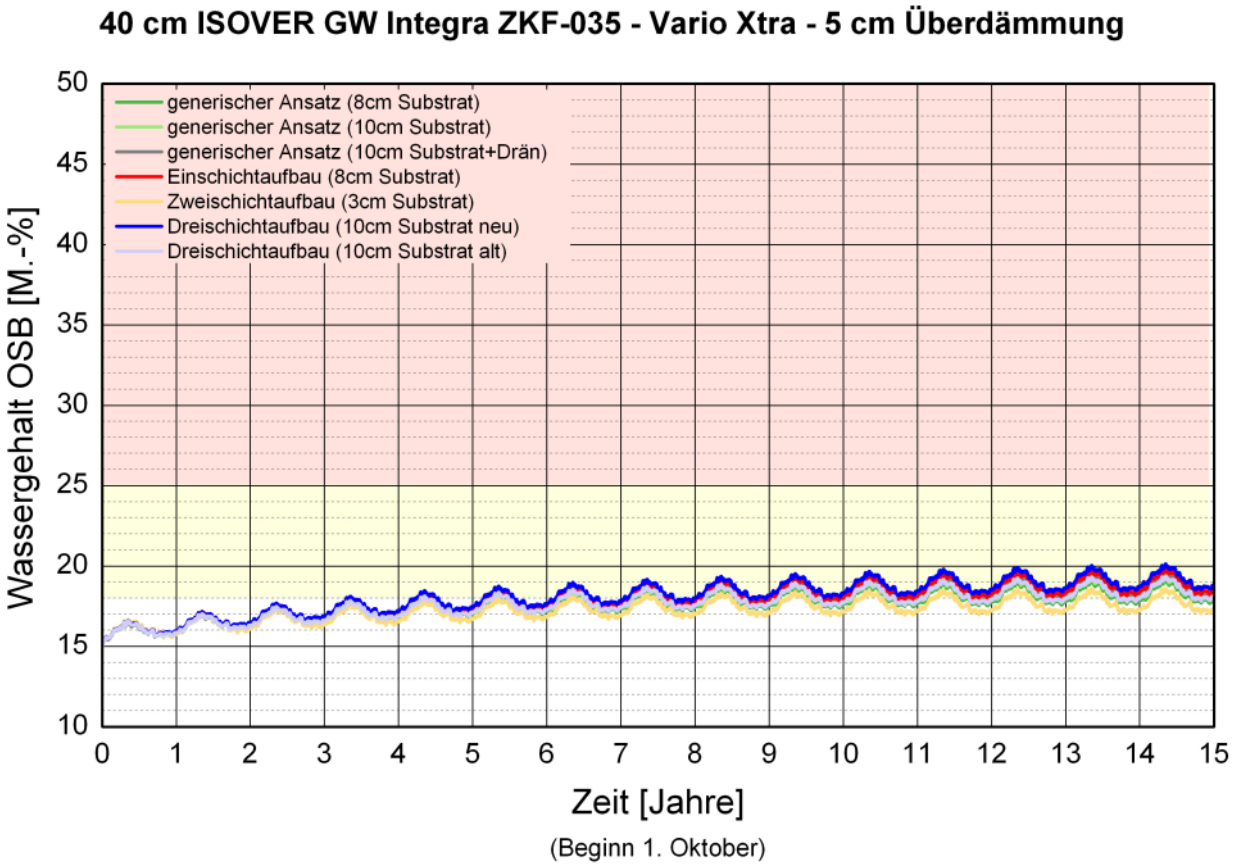


Bild 98:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“, raumseitiger „Vario Xtra“ und 5 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

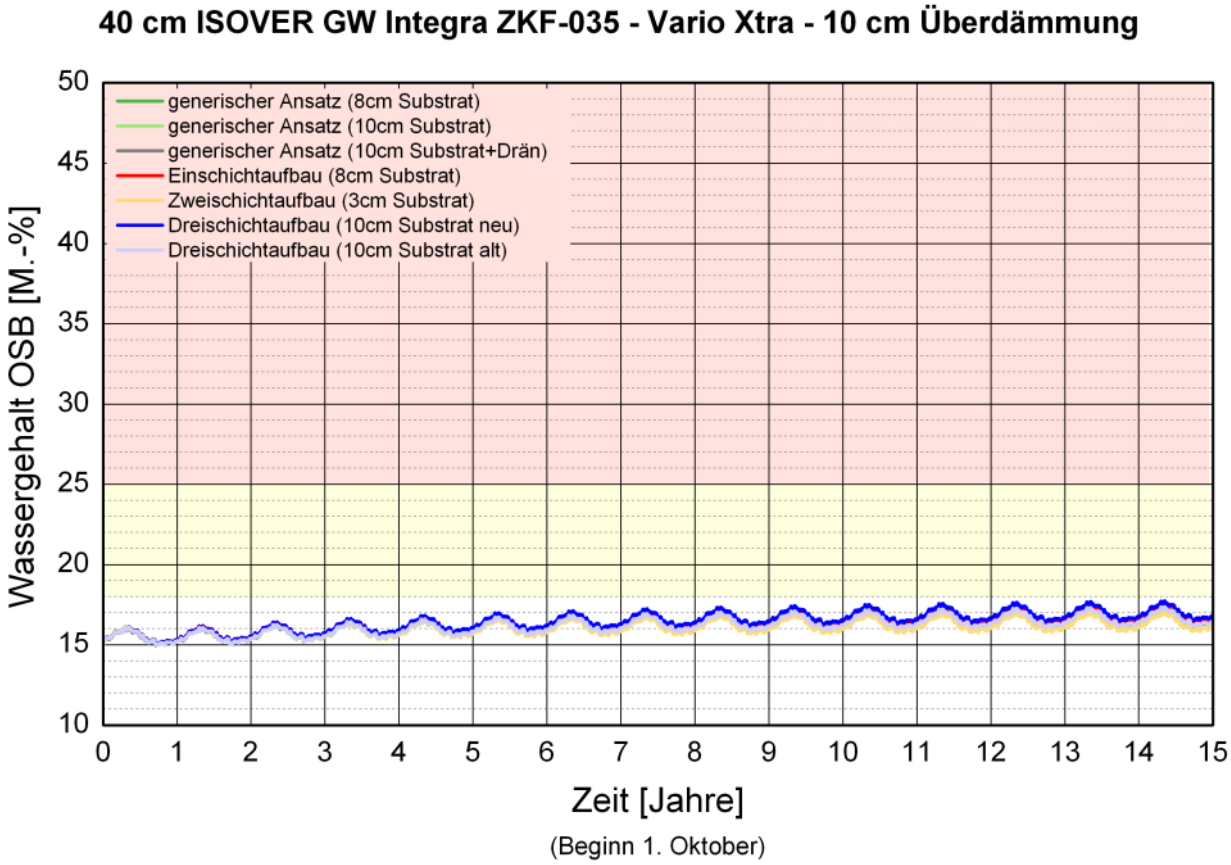


Bild 99:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“, raumseitiger „Vario Xtra“ und 10 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

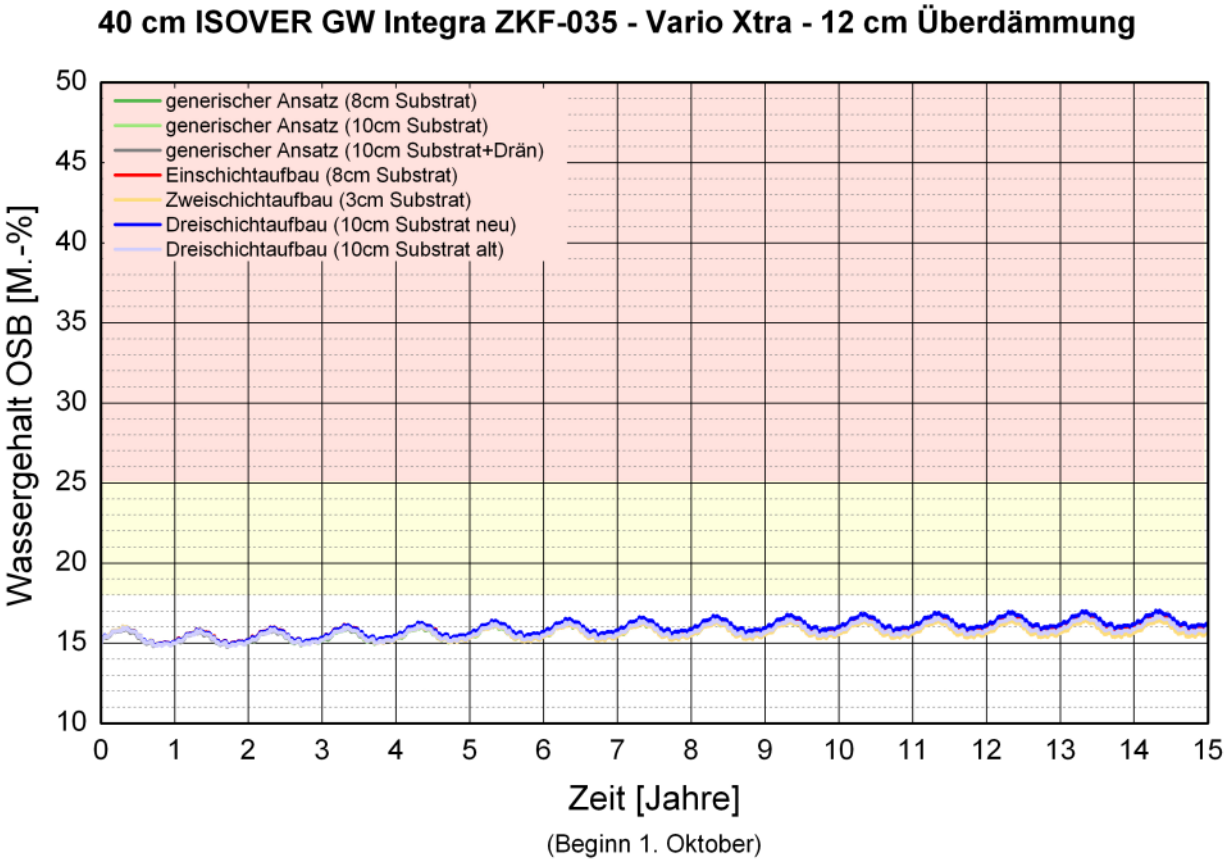


Bild 100:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“, raumseitiger „Vario Xtra“ und 12 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

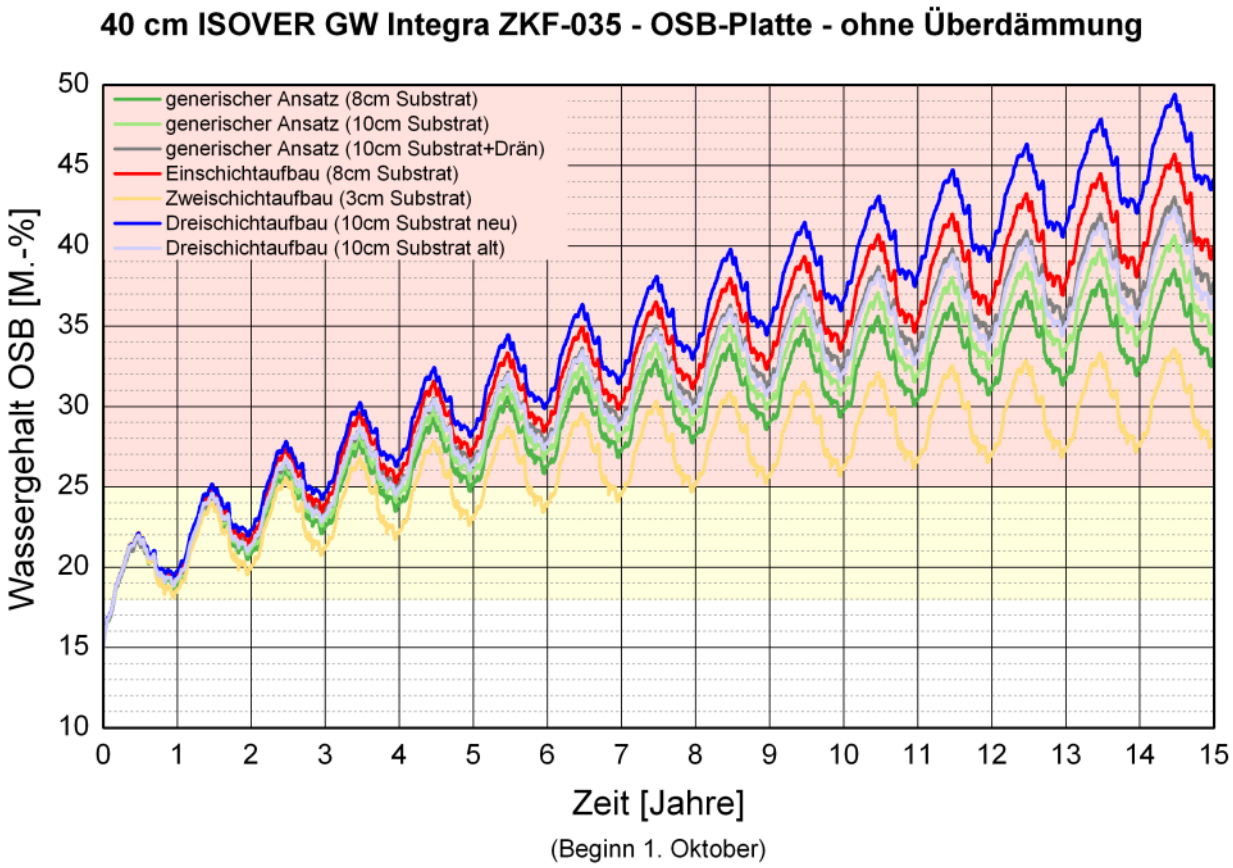


Bild 101:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“ und raumseitiger OSB-Platte ohne Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

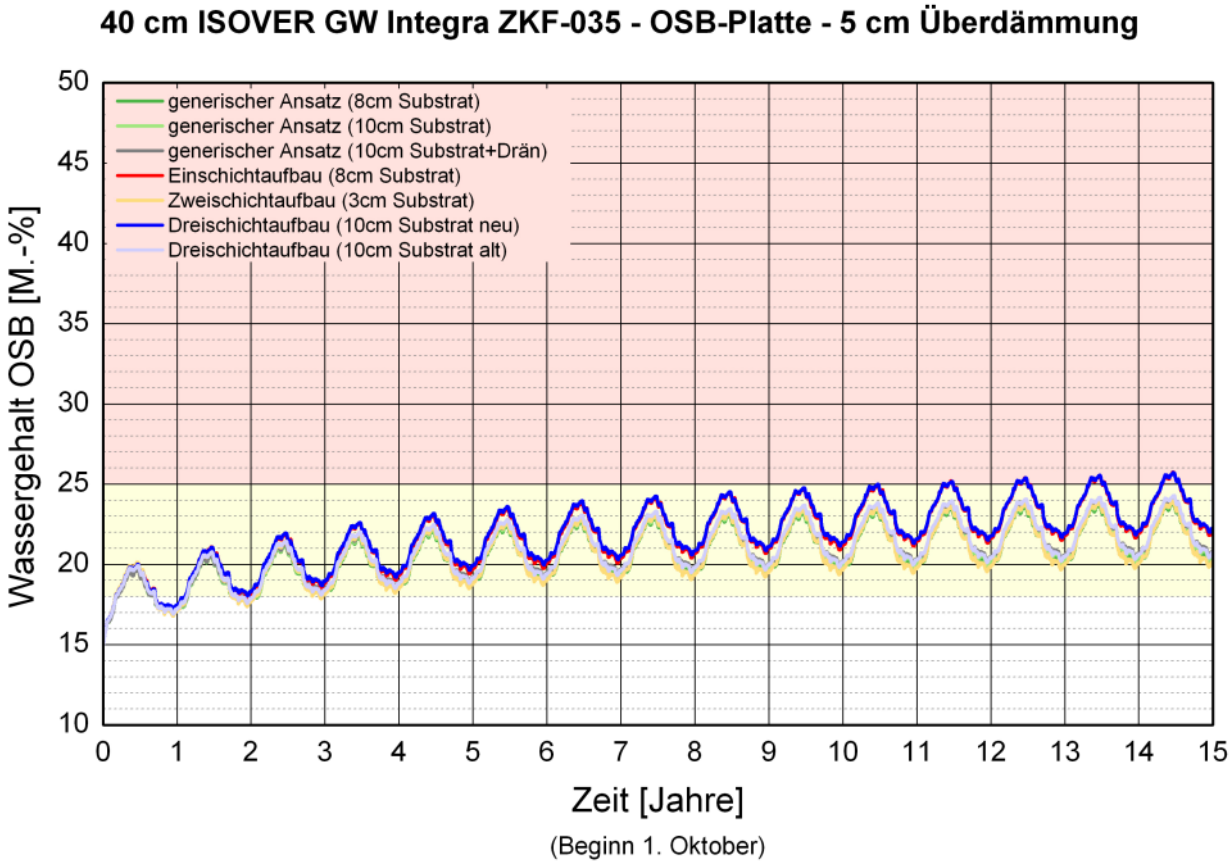


Bild 102:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“, raumseitiger OSB-Platte und 5 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

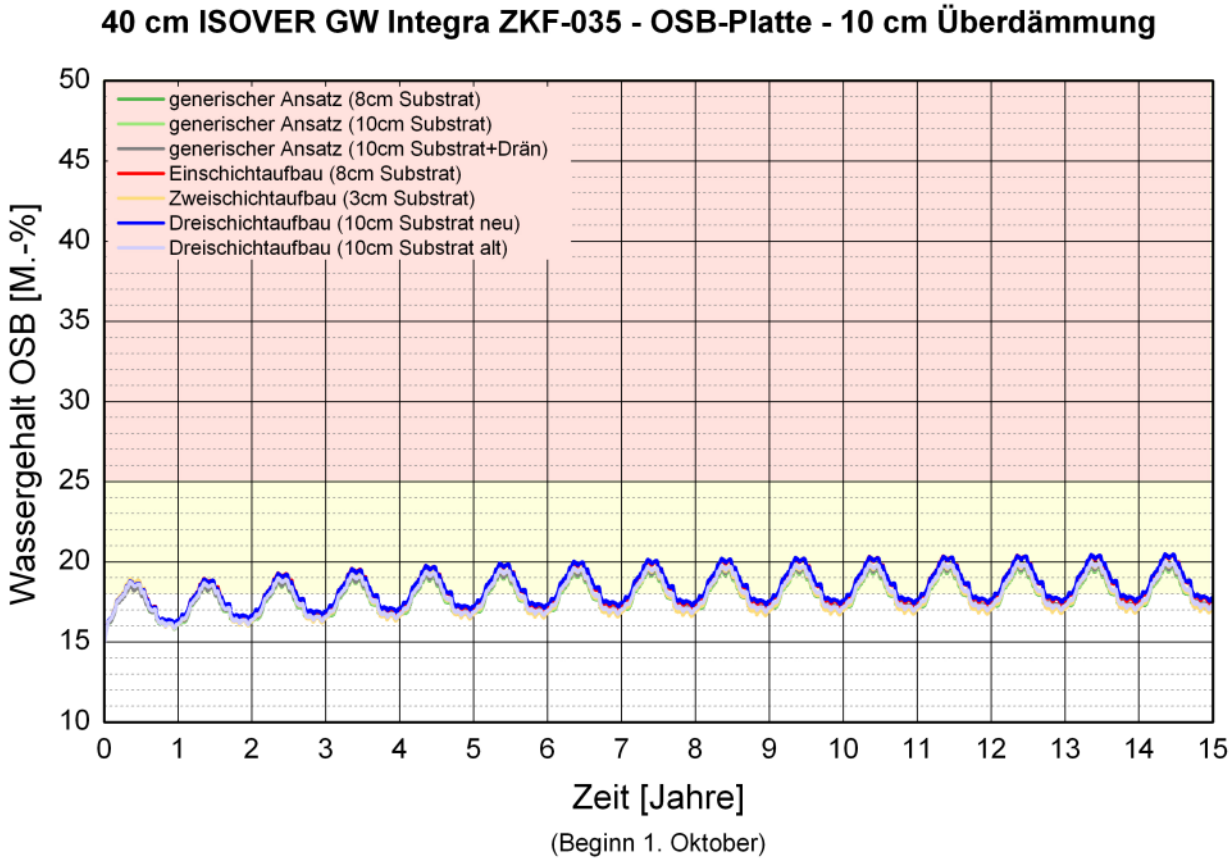


Bild 103:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“, raumseitiger OSB-Platte und 10 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

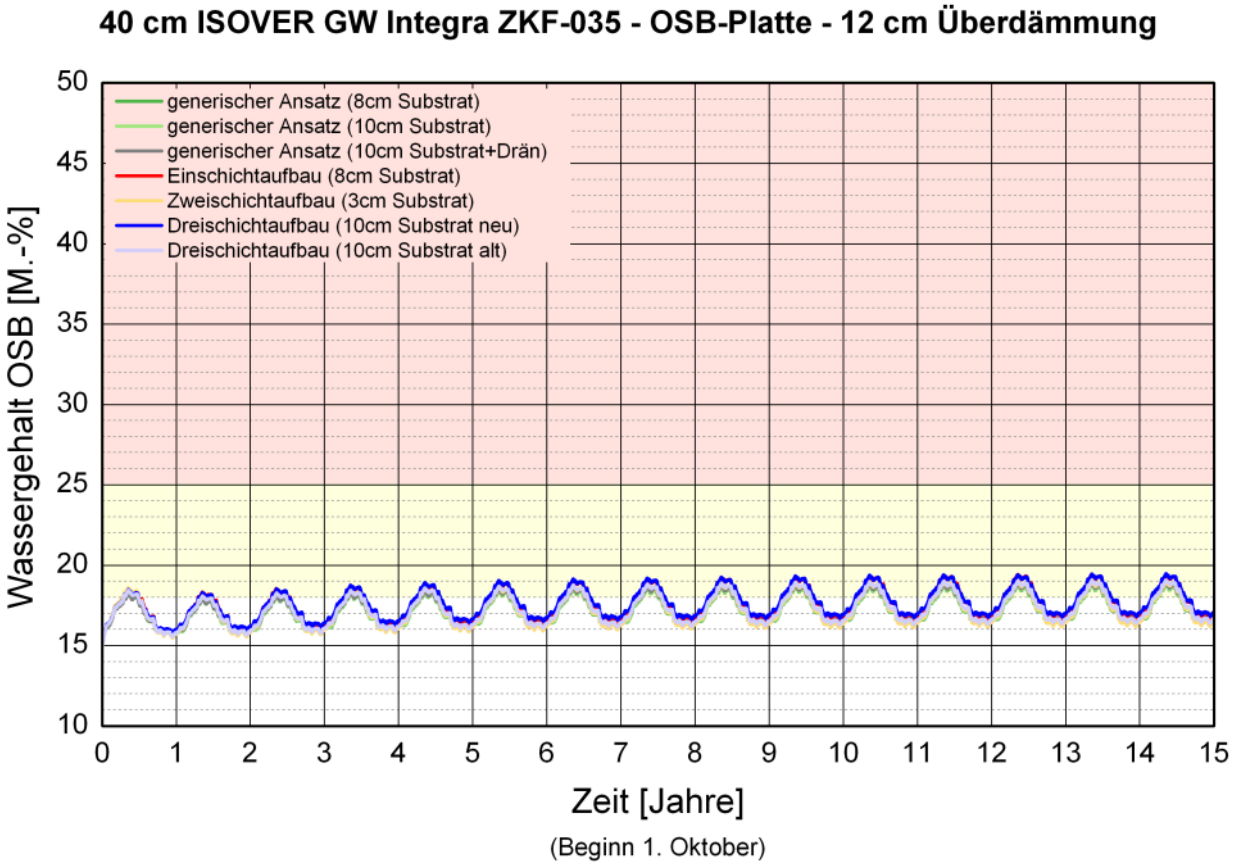


Bild 104:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“, raumseitiger OSB-Platte und 12 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

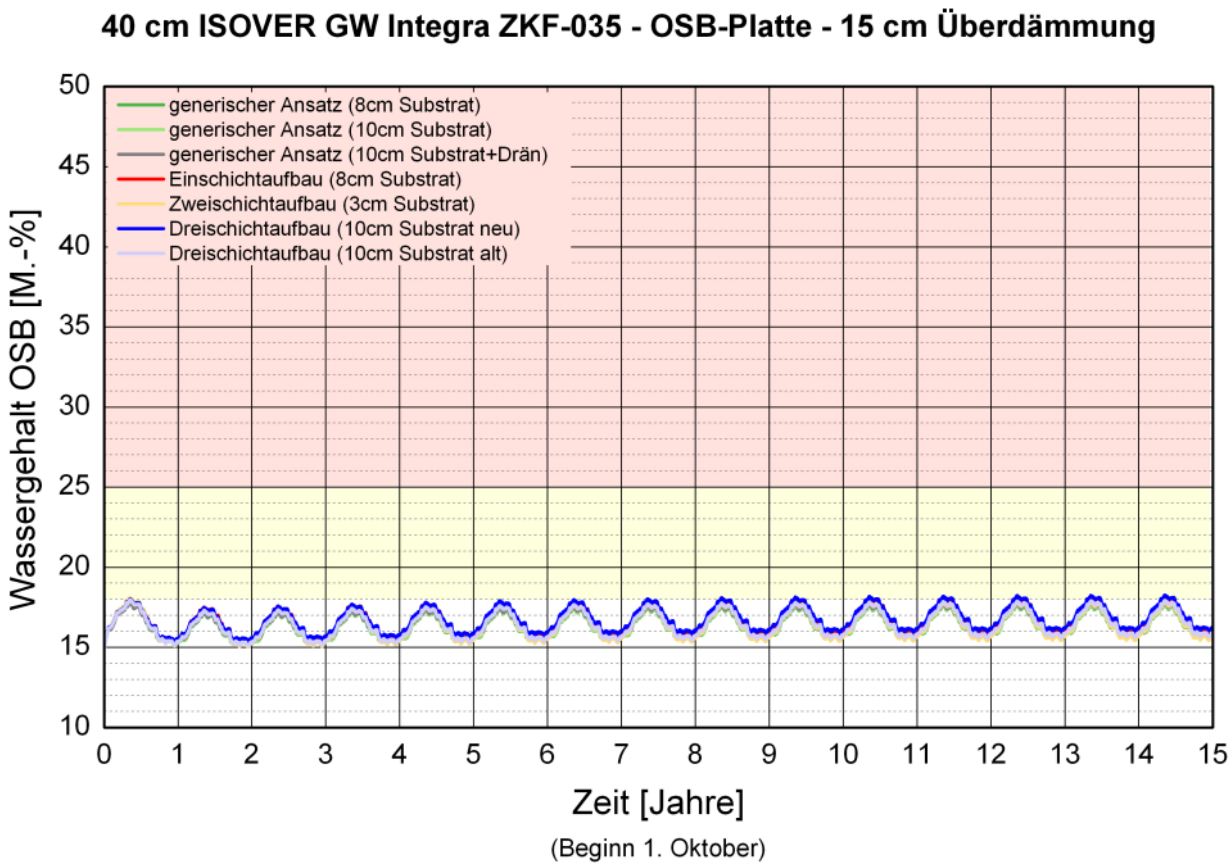


Bild 105:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“, raumseitiger OSB-Platte und 15 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

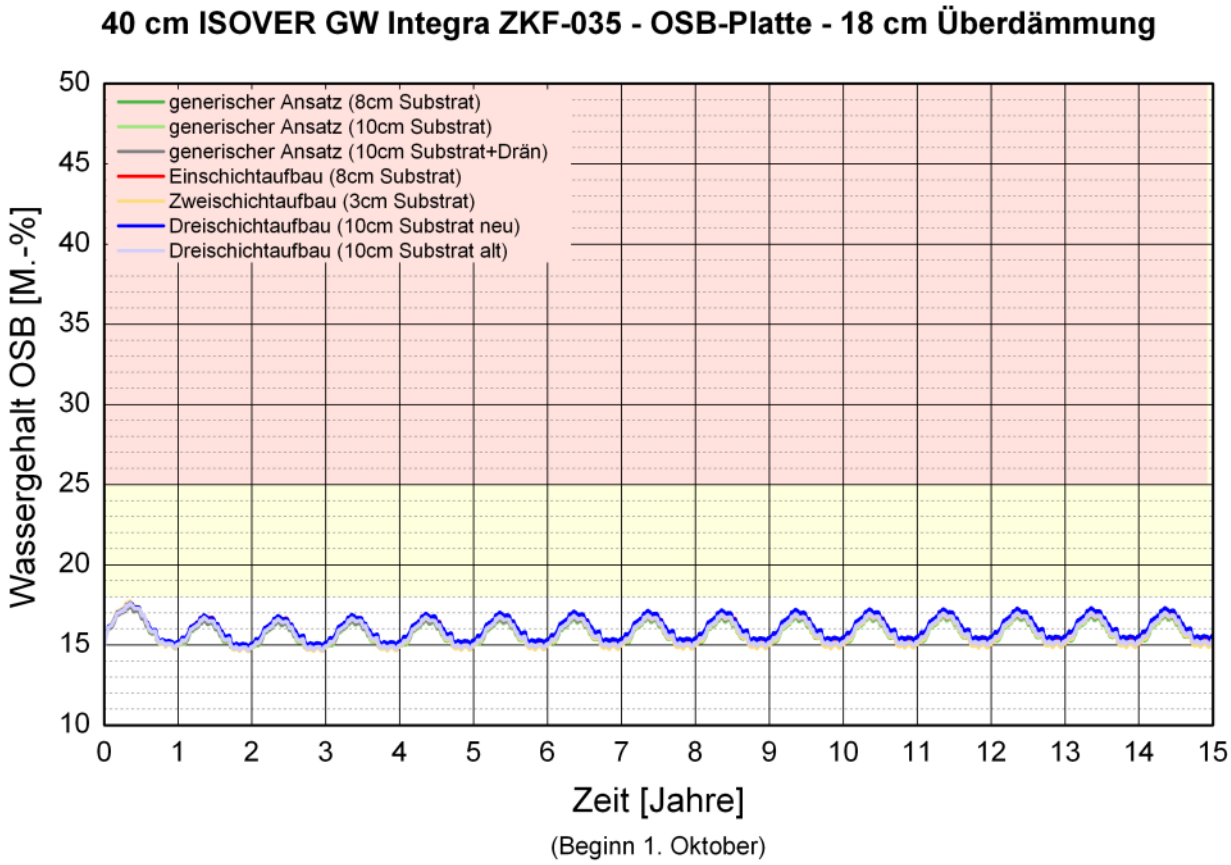


Bild 106:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „ISOVER GW Integra ZKF-035“, raumseitiger OSB-Platte und 18 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

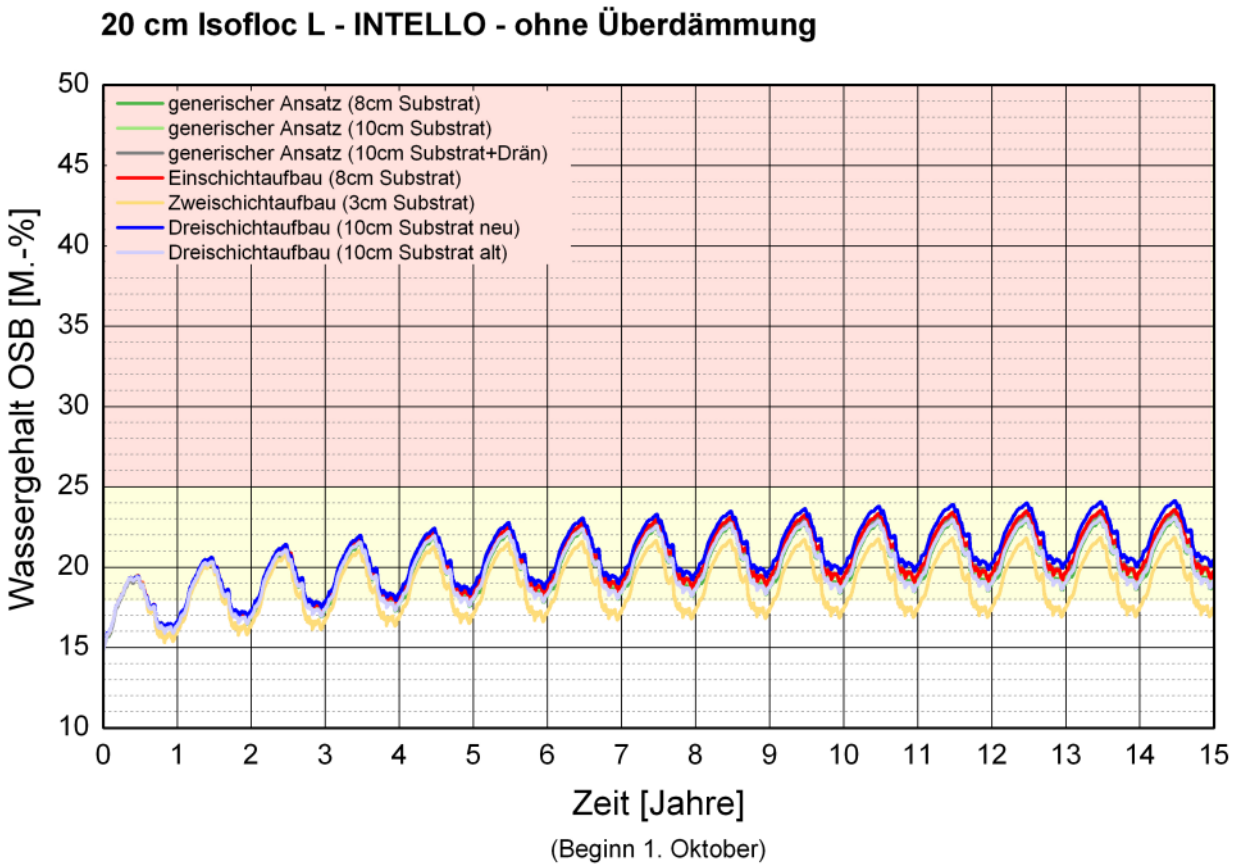


Bild 107:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 20 cm „Isofloc L“ und raumseitiger „INTELLO“ ohne Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

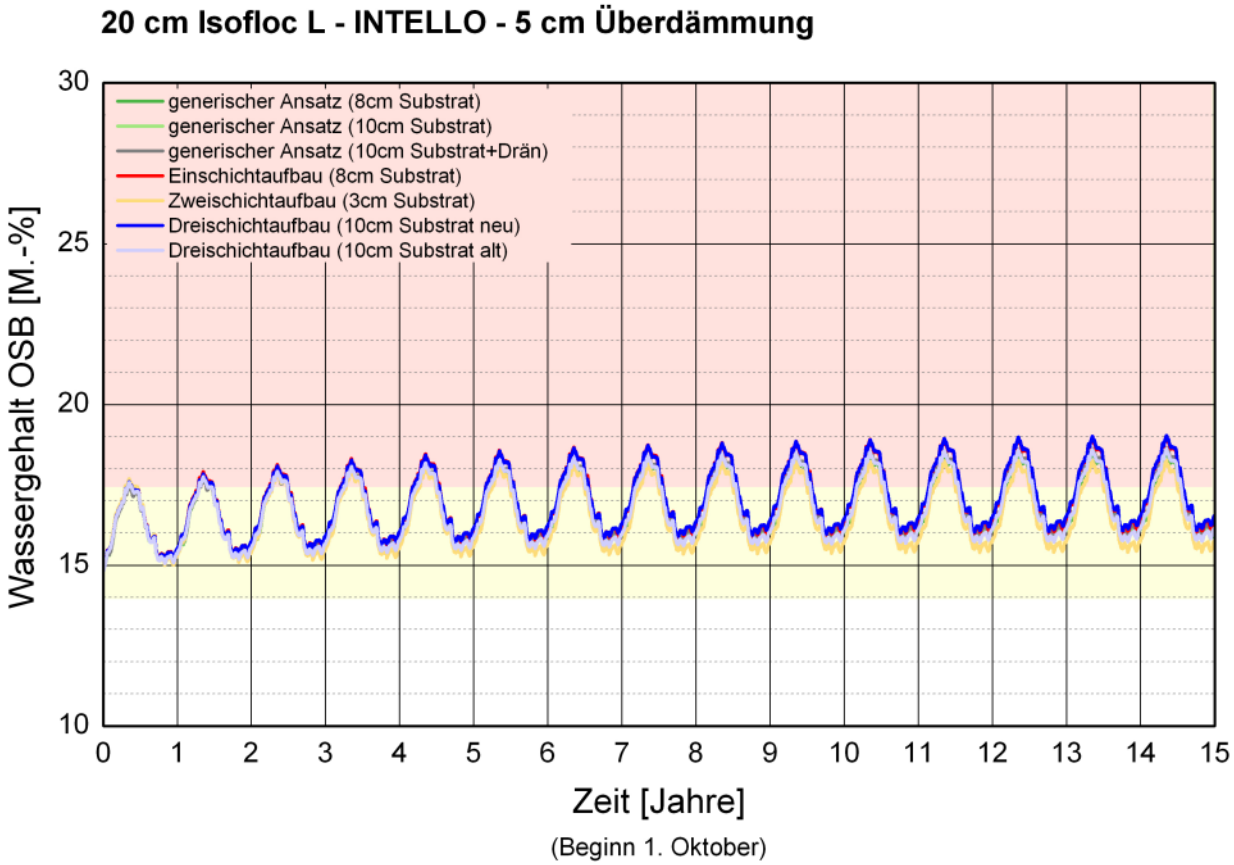


Bild 108:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 20 cm „Isofloc L“, raumseitiger „INTELLO“ und 5 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

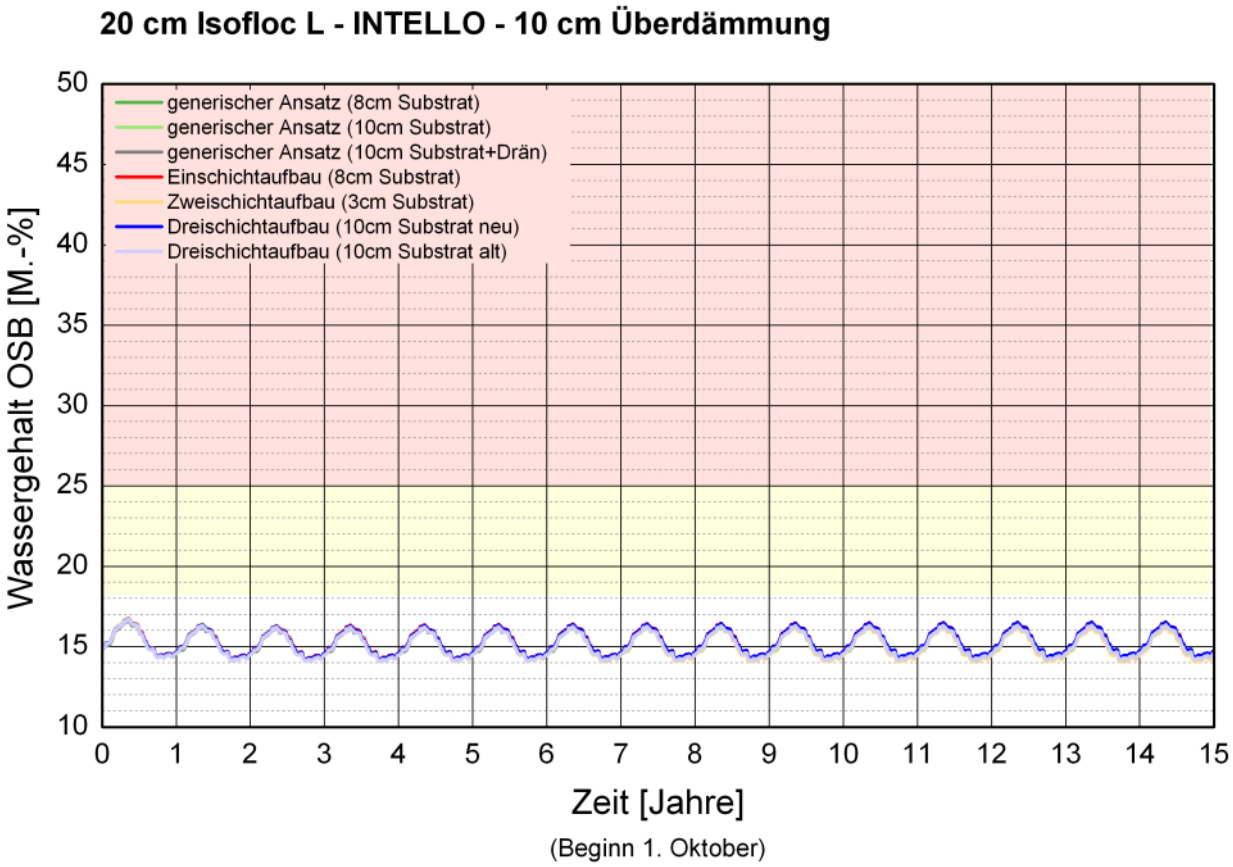


Bild 109:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 20 cm „Isofloc L“, raumseitiger „INTELLO“ und 10 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

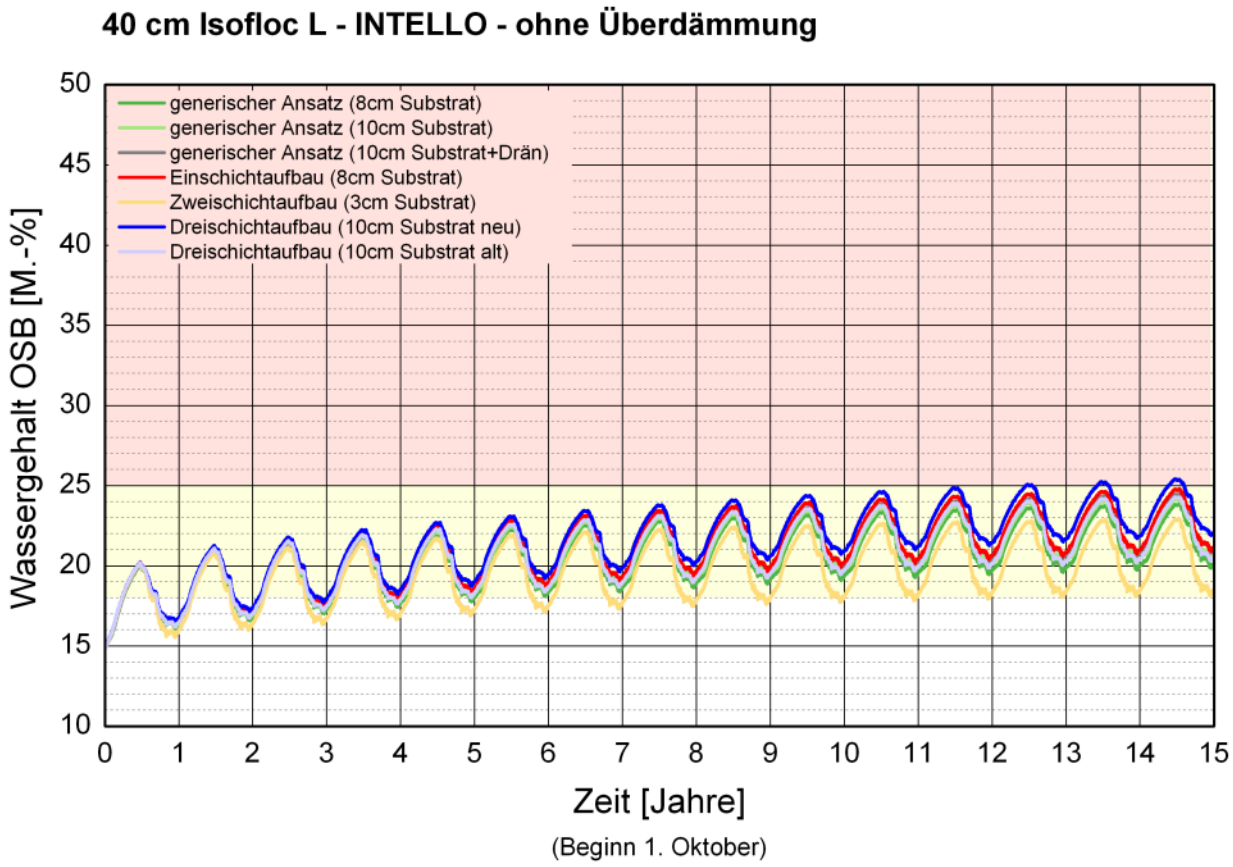


Bild 110:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“ und raumseitiger „INTELLO“ ohne Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

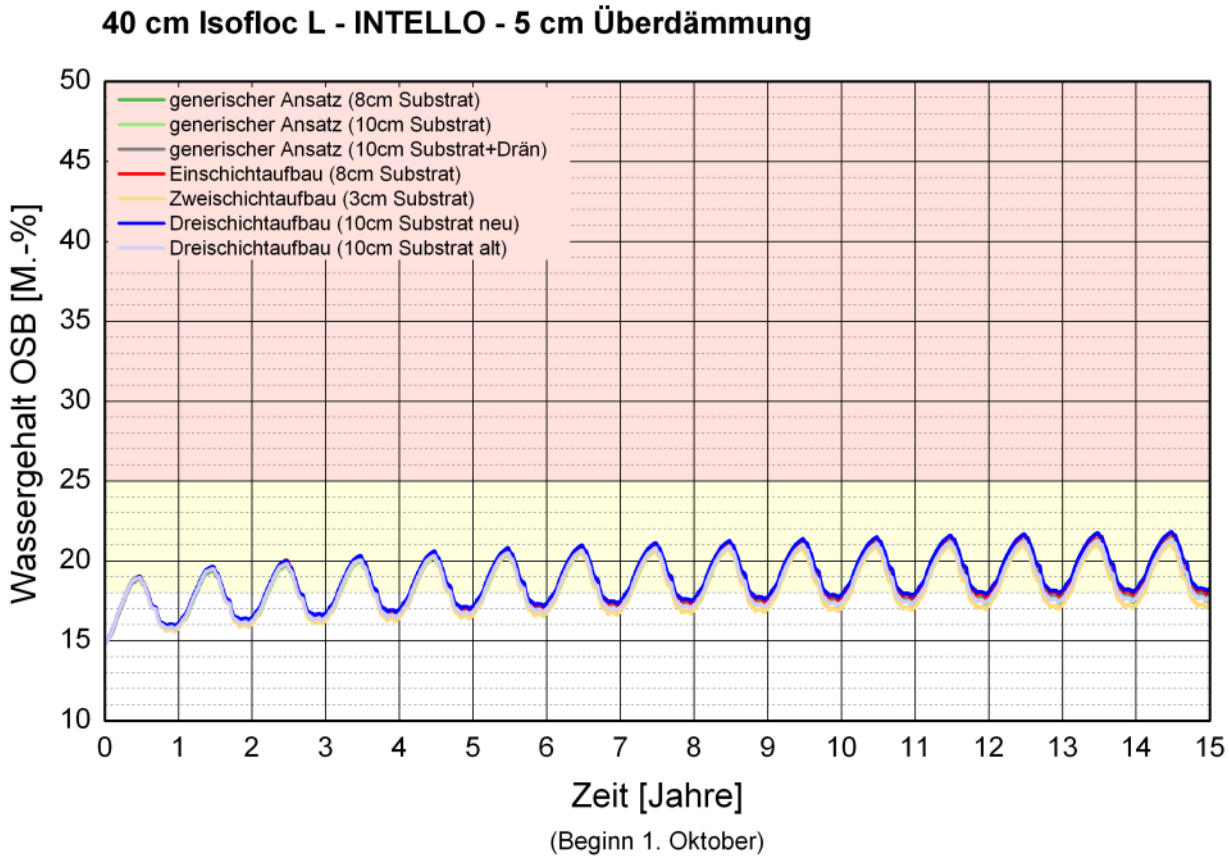


Bild 111:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“, raumseitiger „INTELLO“ und 5 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

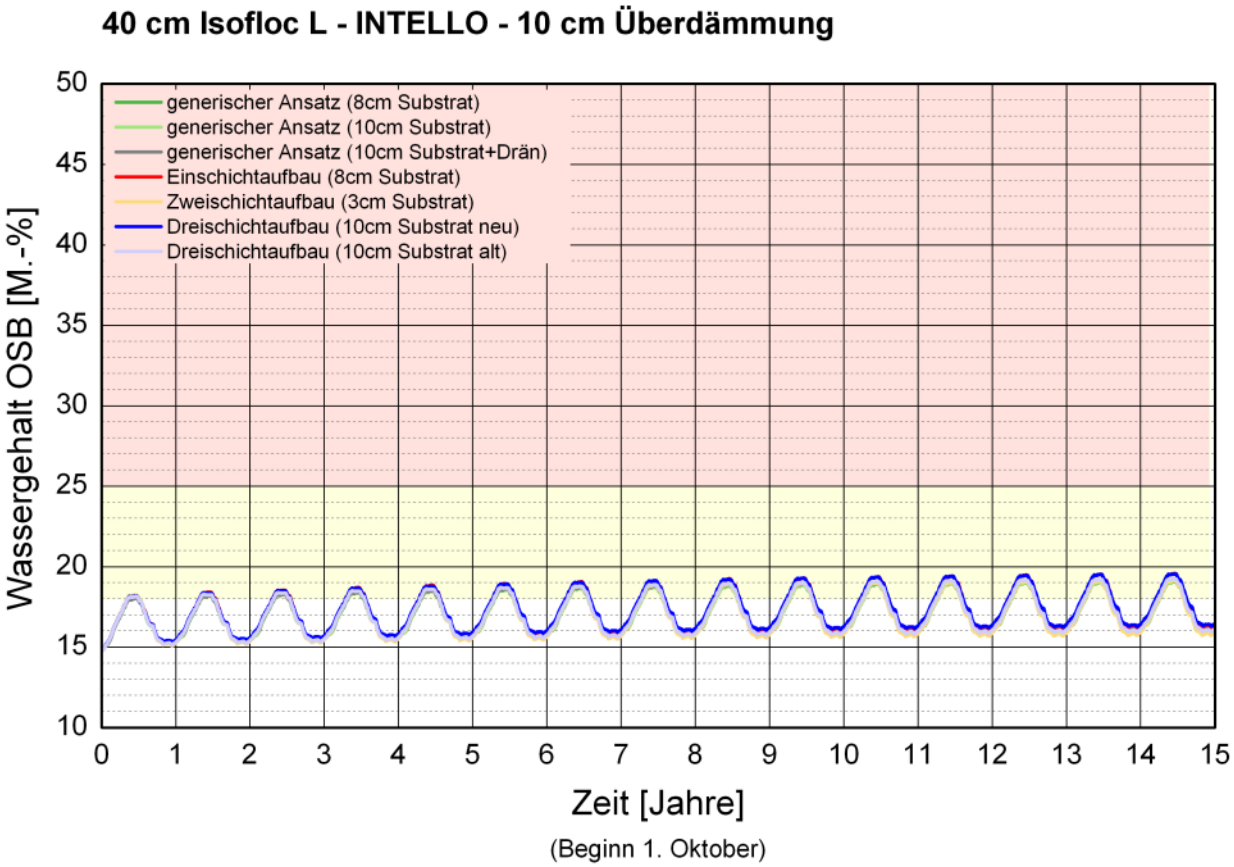


Bild 112:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“, raumseitiger „INTELLO“ und 10 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

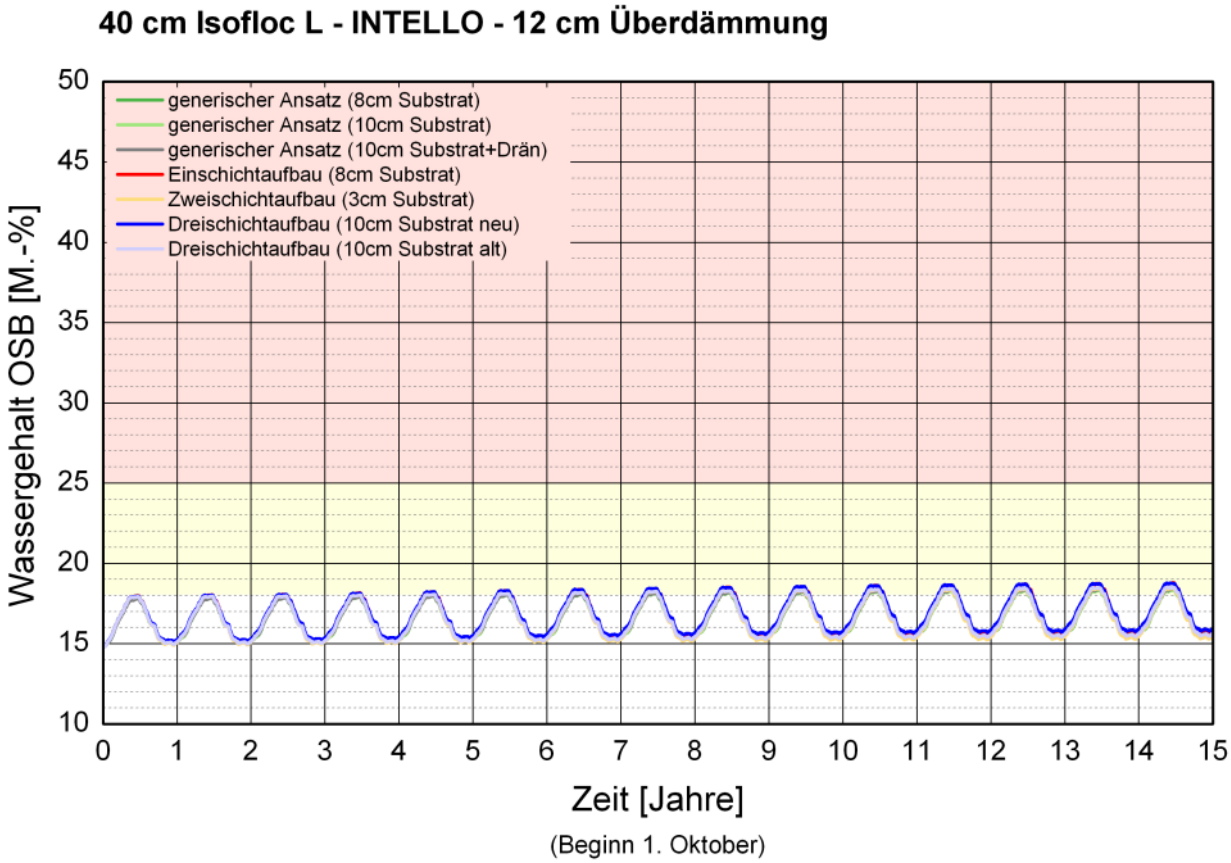


Bild 113:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“, raumseitiger „INTELLO“ und 12 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

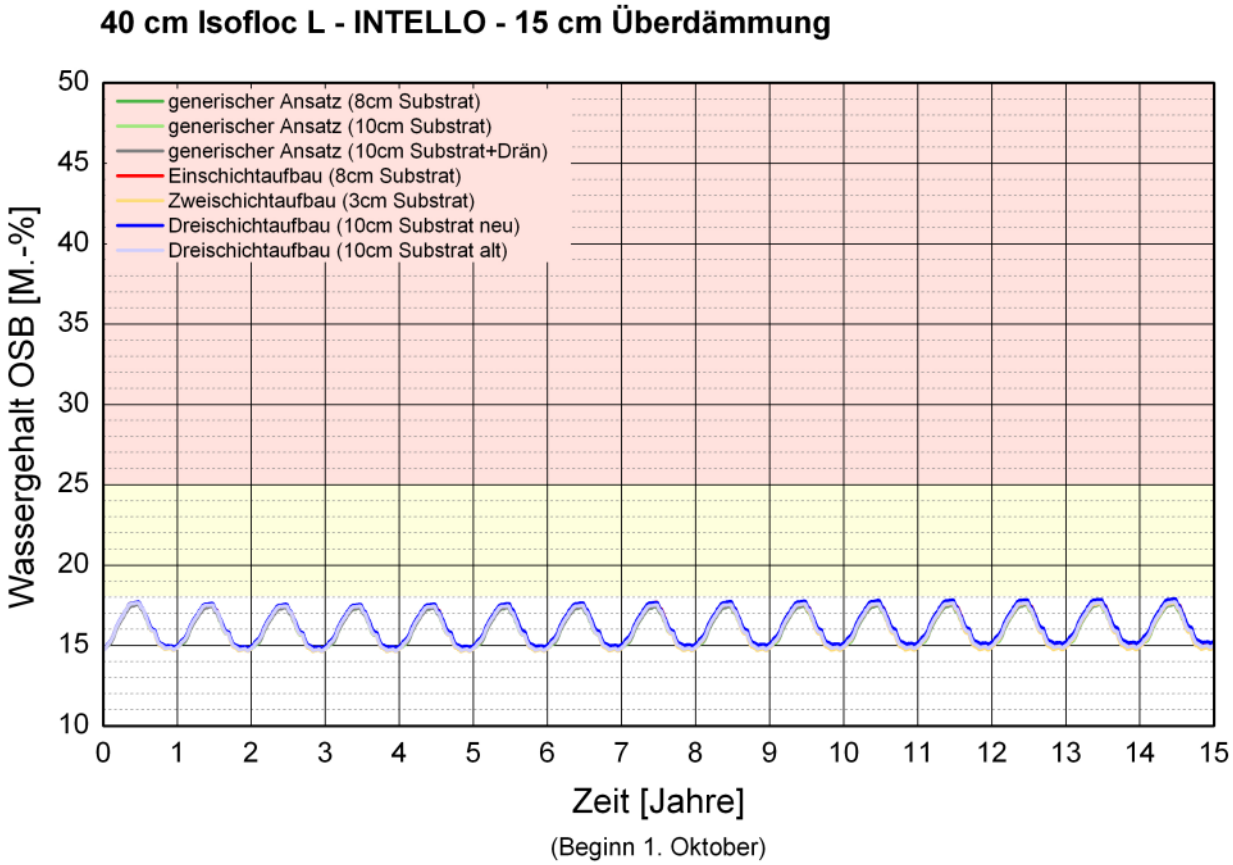


Bild 114:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“, raumseitiger „INTELLO“ und 15 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

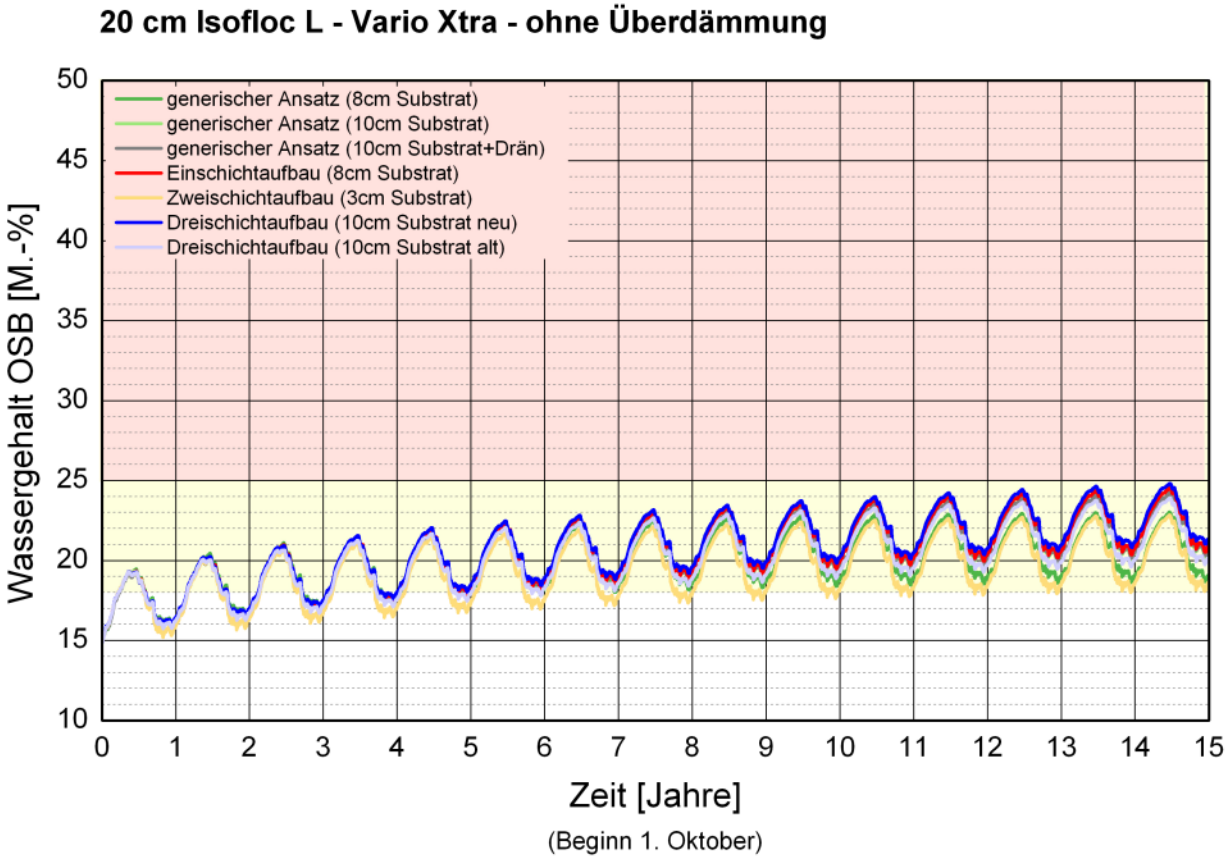


Bild 115:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 20 cm „Isofloc L“ und raumseitiger „Vario Xtra“ ohne Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

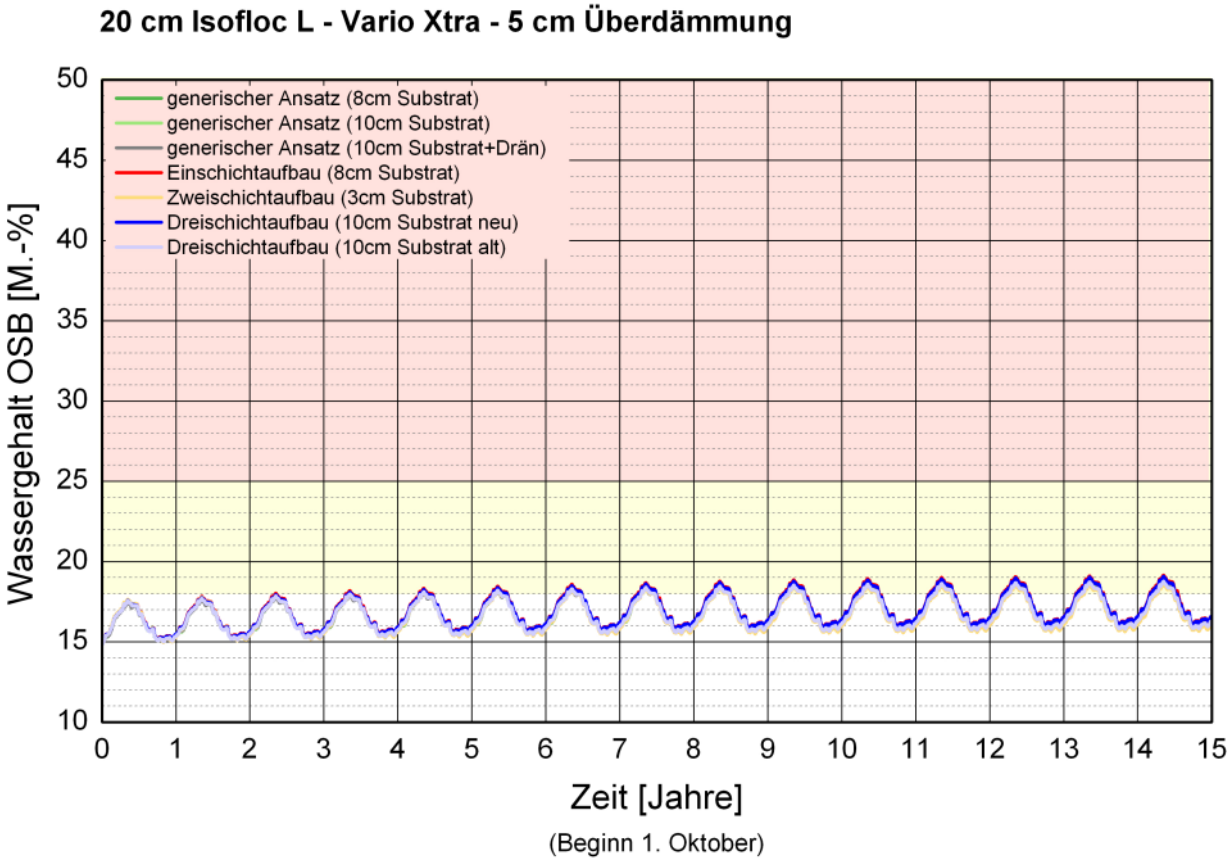


Bild 116:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 20 cm „Isofloc L“, raumseitiger „Vario Xtra“ und 5 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

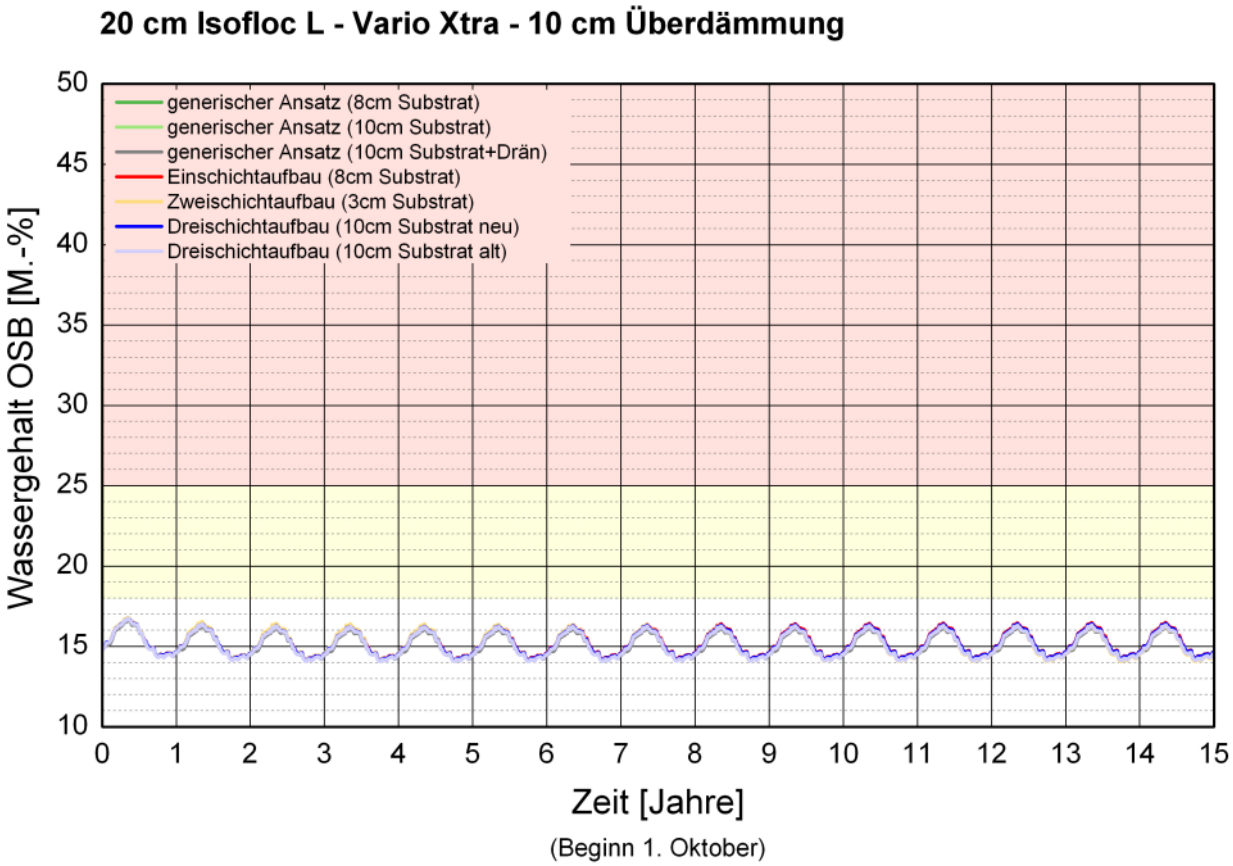


Bild 117:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 20 cm „Isofloc L“, raumseitiger „Vario Xtra“ und 10 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

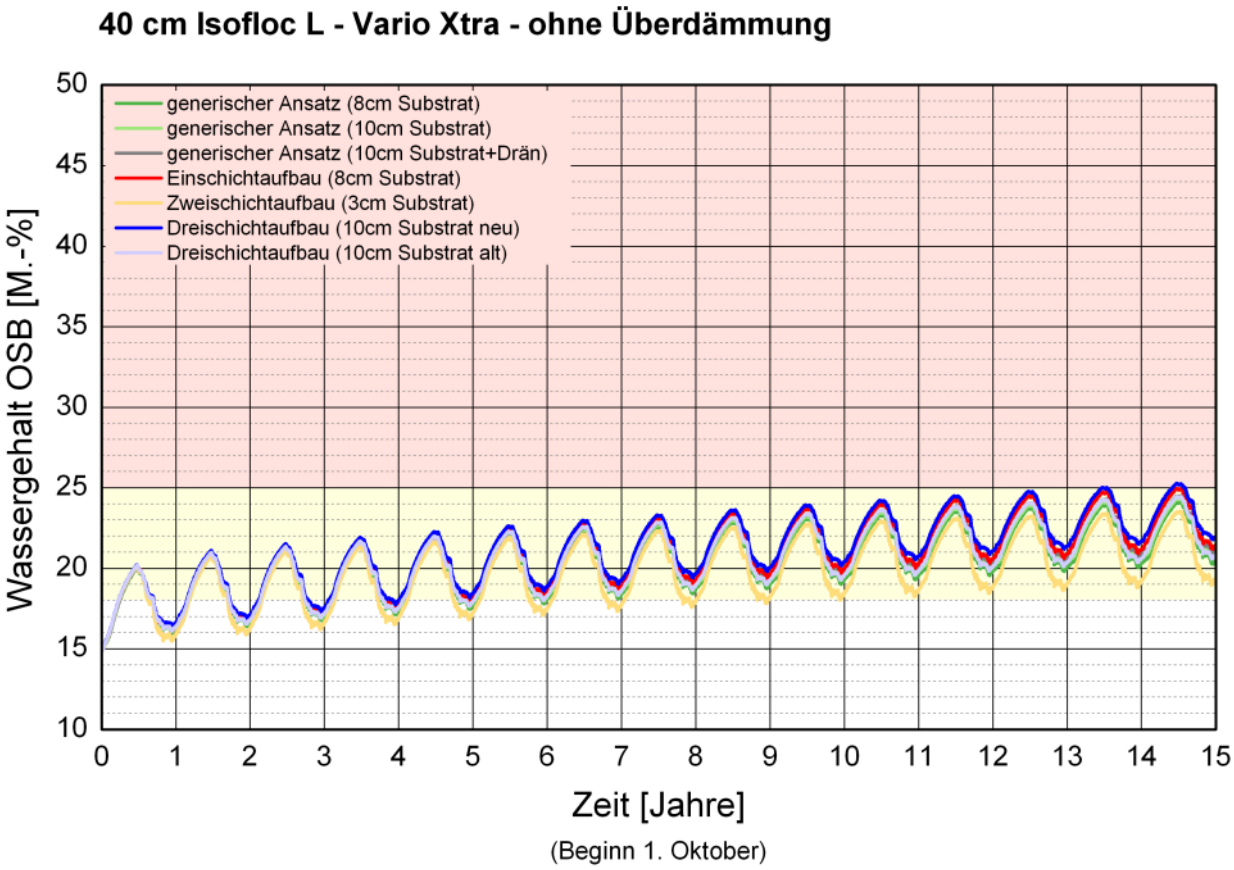


Bild 118:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“ und raumseitiger „Vario Xtra“ ohne Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

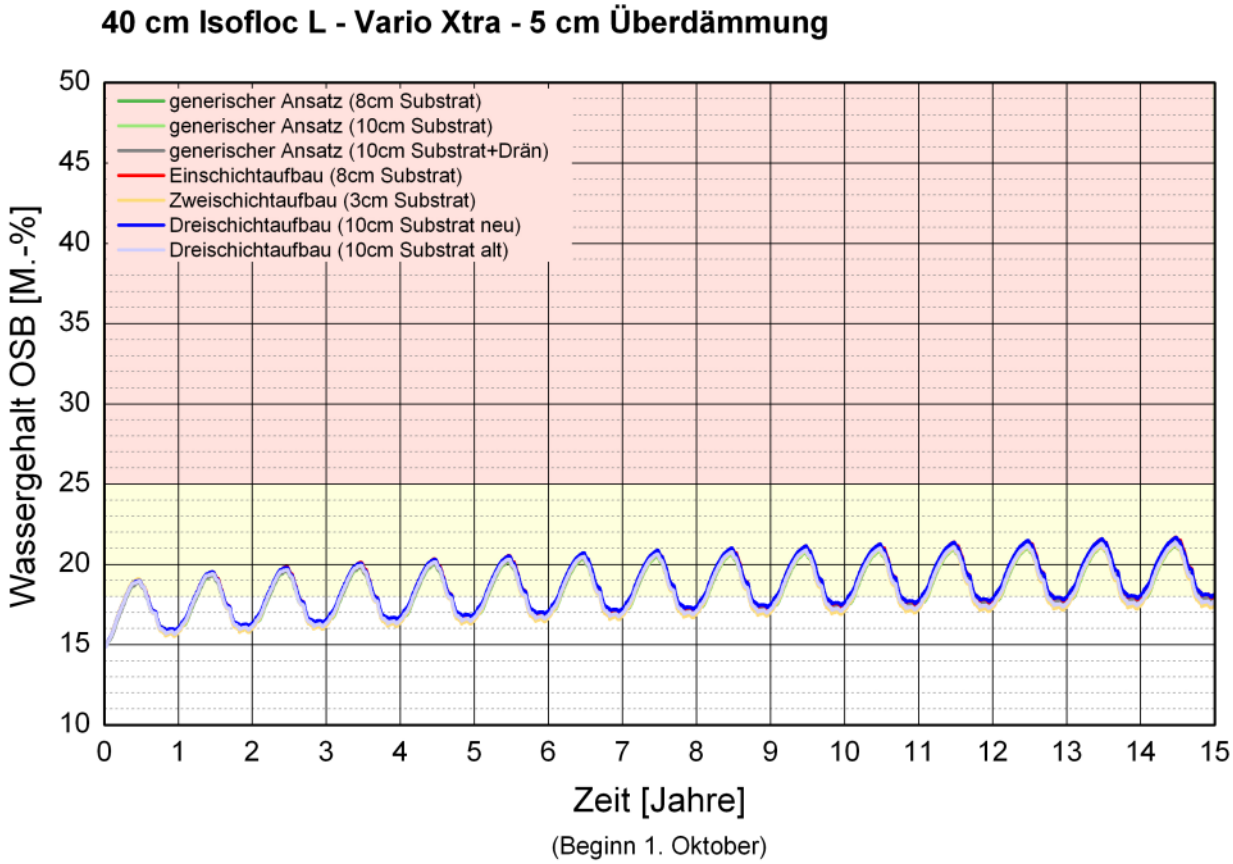


Bild 119:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“, raumseitiger „Vario Xtra“ und 5 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

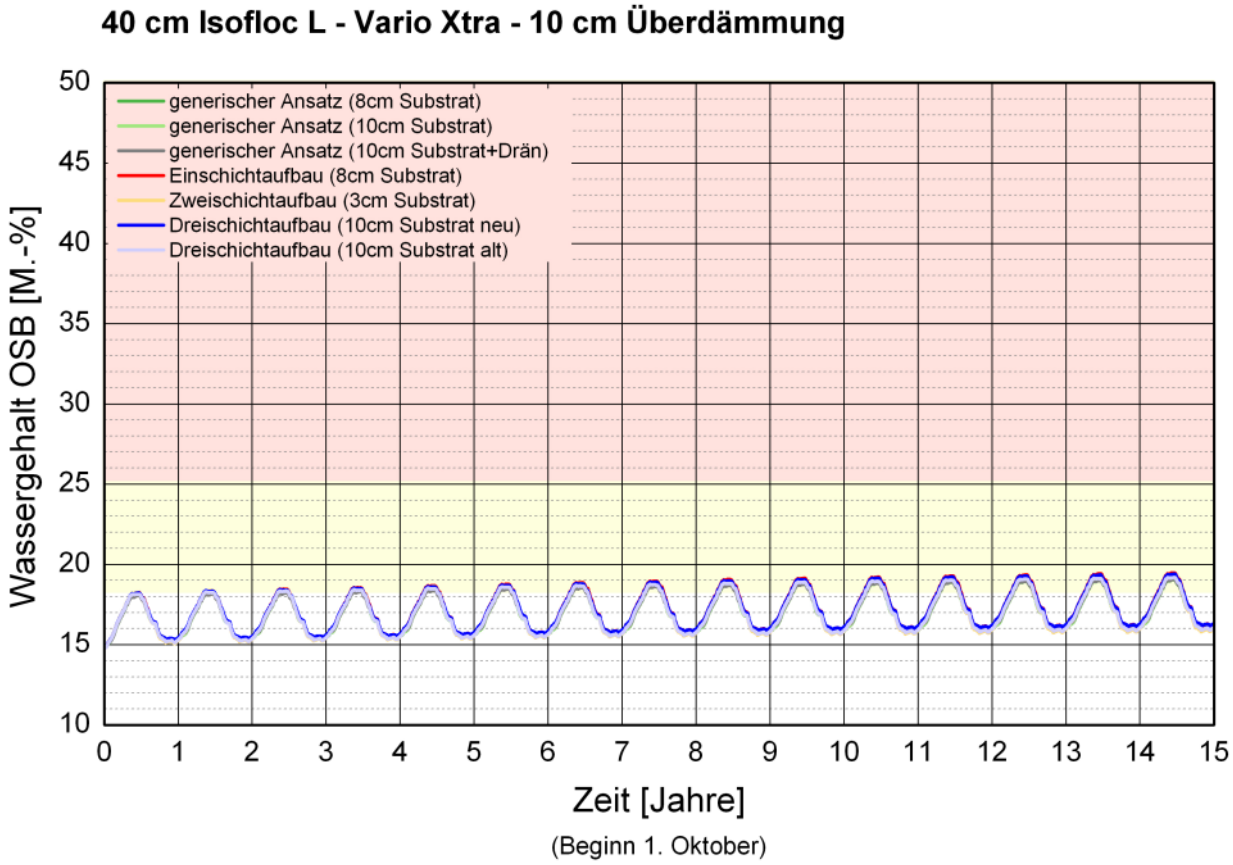


Bild 120:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“, raumseitiger „Vario Xtra“ und 10 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

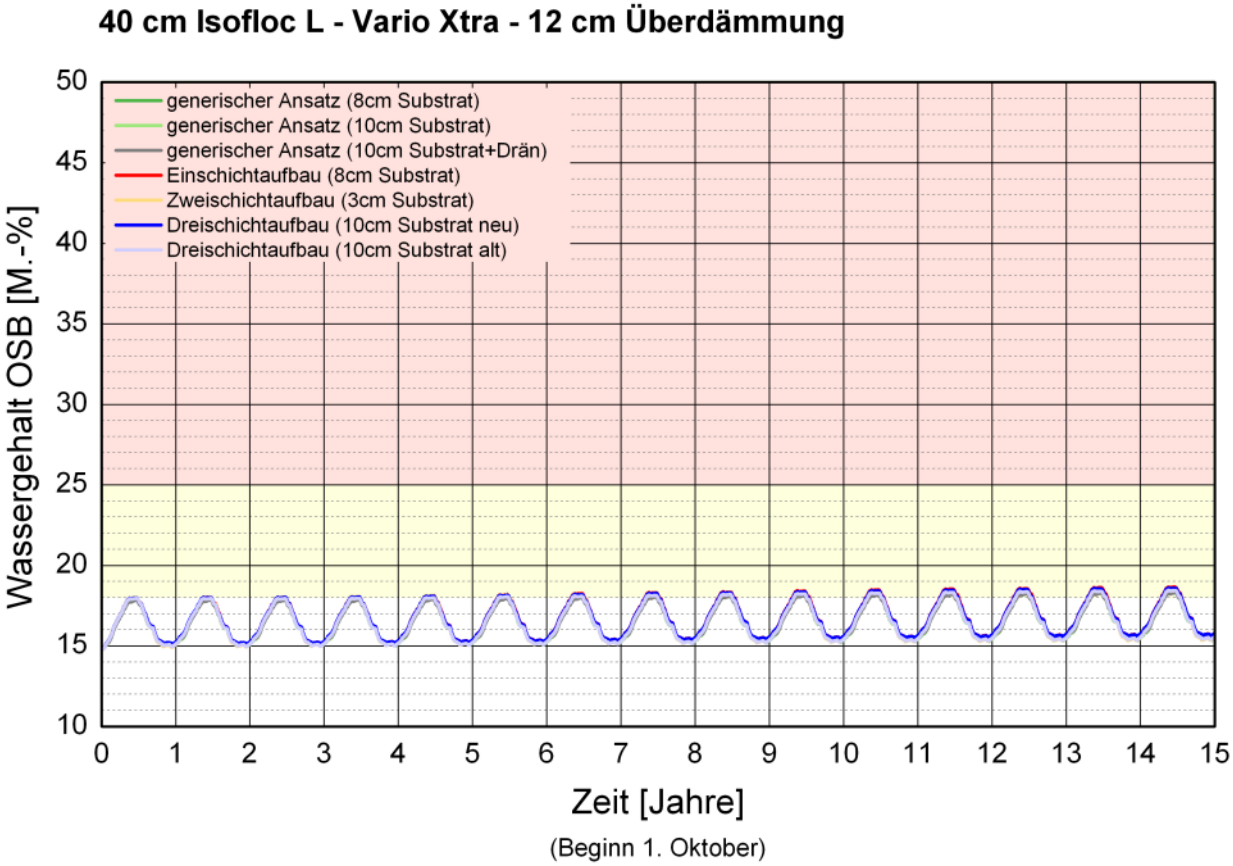


Bild 121:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“, raumseitiger „Vario Xtra“ und 12 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

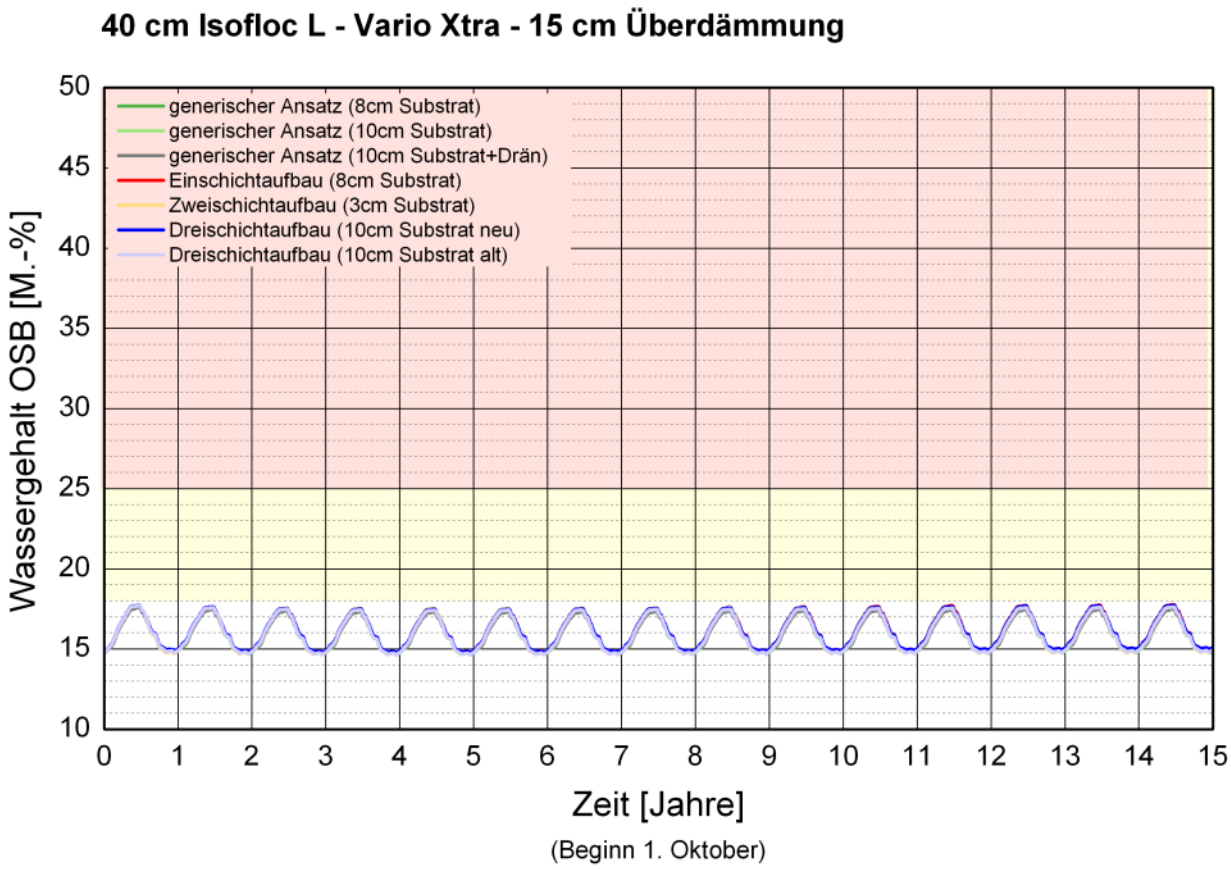


Bild 122:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“, raumseitiger „Vario Xtra“ und 15 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

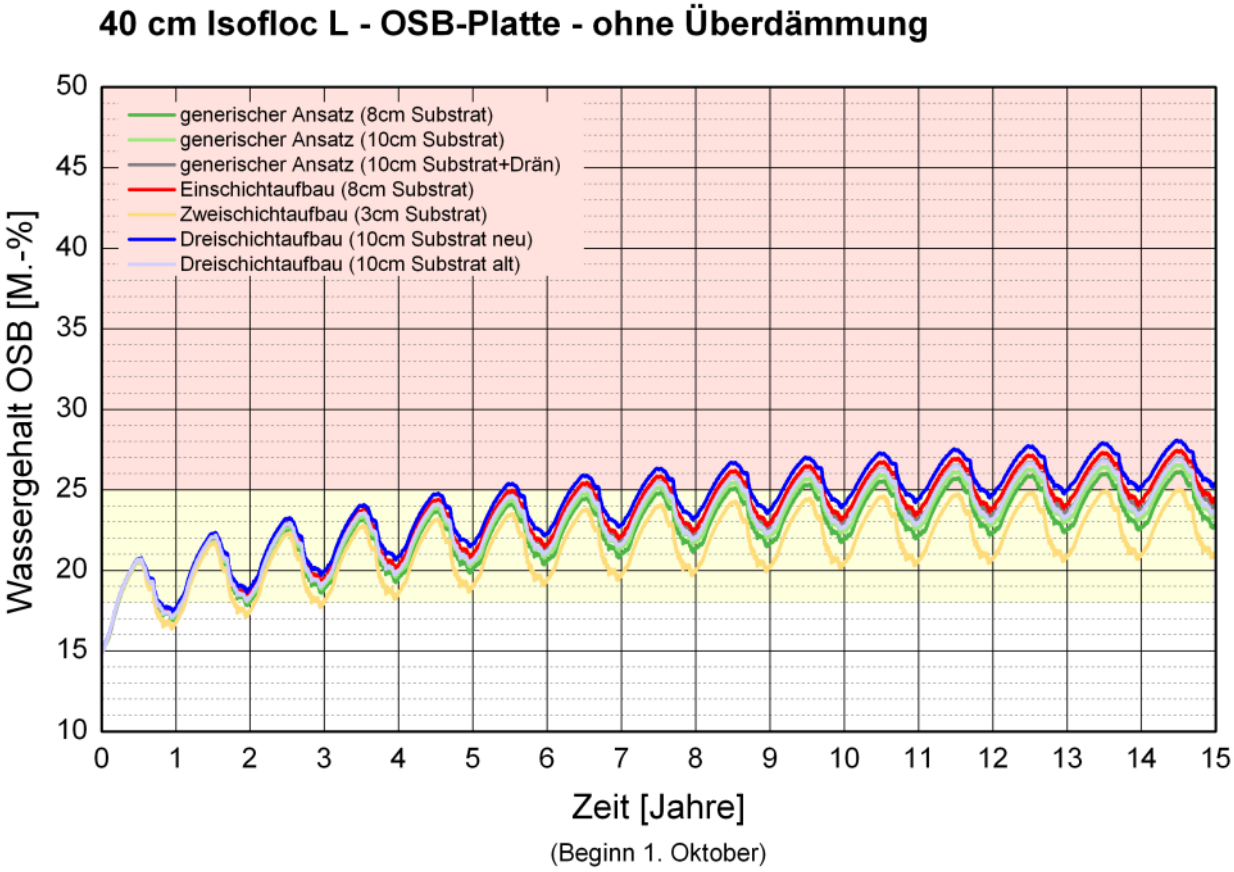


Bild 123:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“ und raumseitiger OSB-Platte ohne Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

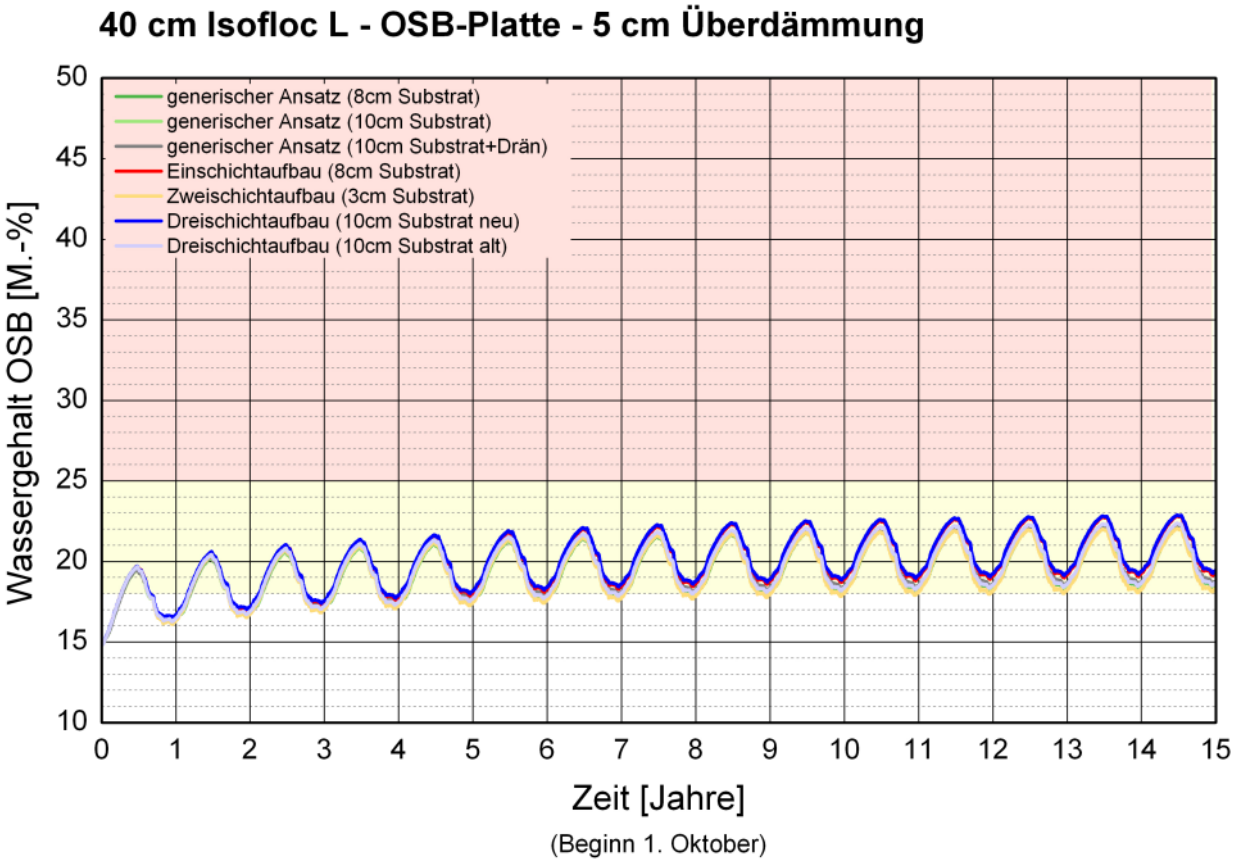


Bild 124:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“, raumseitiger OSB-Platte und 5 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

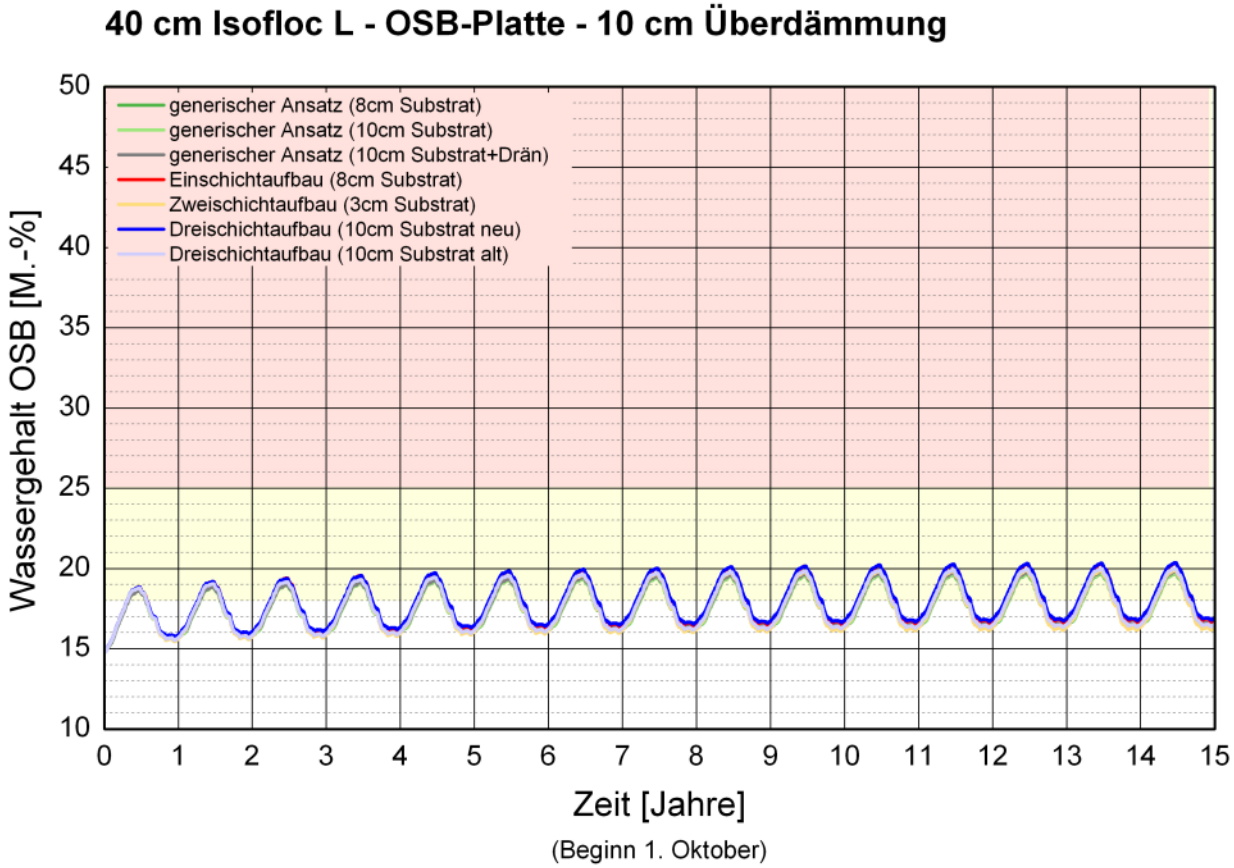


Bild 125:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“, raumseitiger OSB-Platte und 10 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

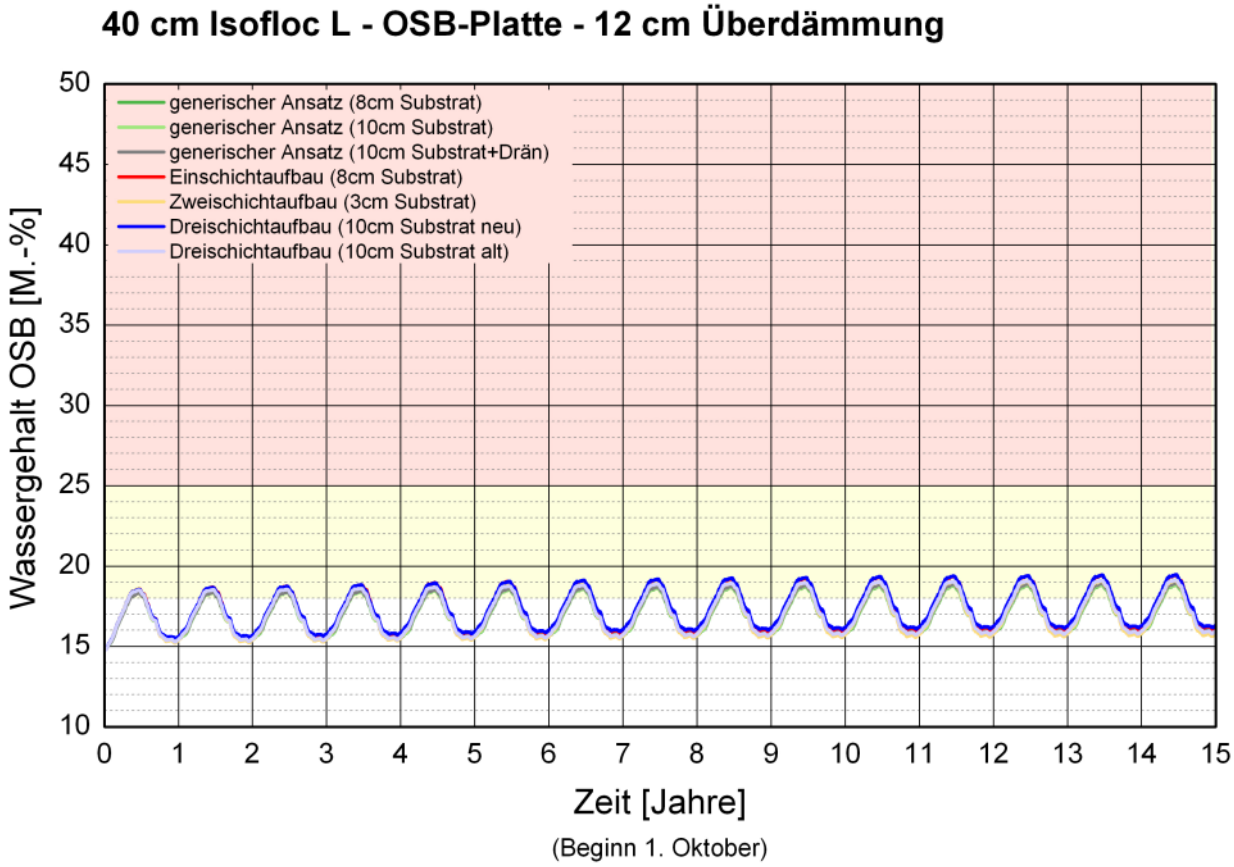


Bild 126:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“, raumseitiger OSB-Platte und 12 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

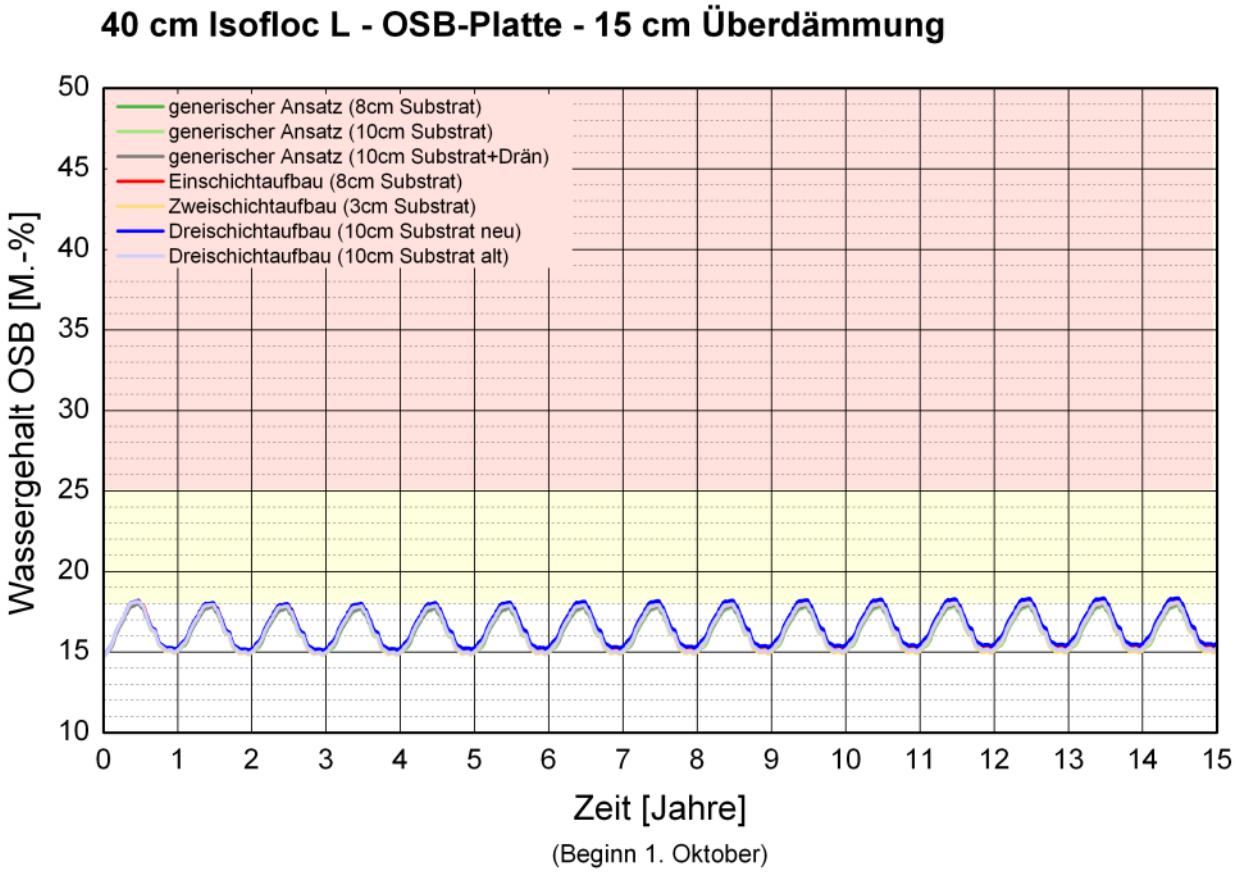


Bild 127:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“, raumseitiger OSB-Platte und 15 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

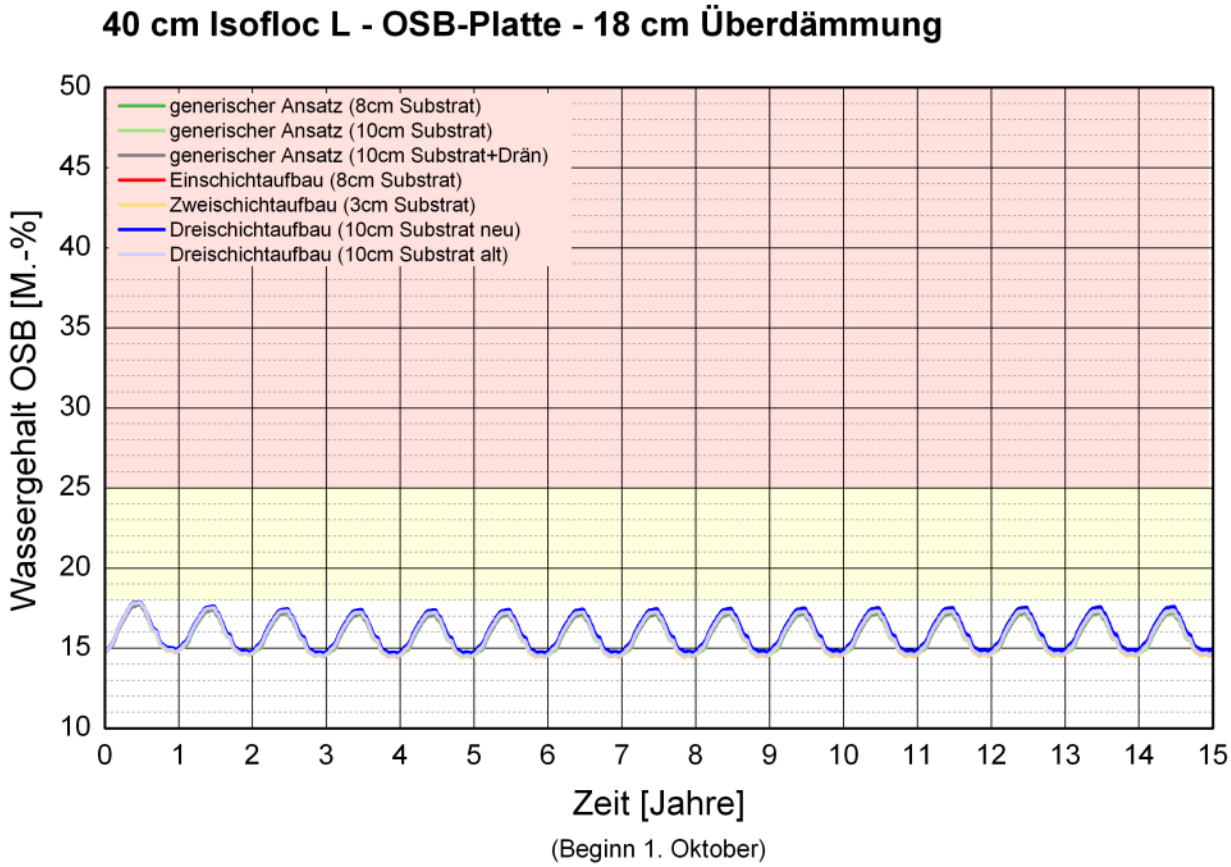
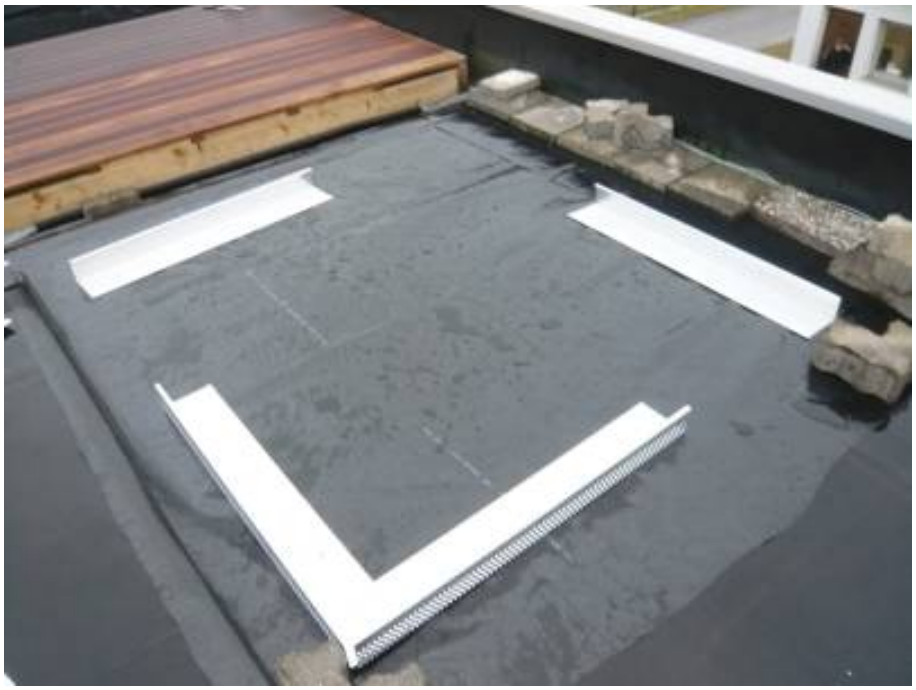


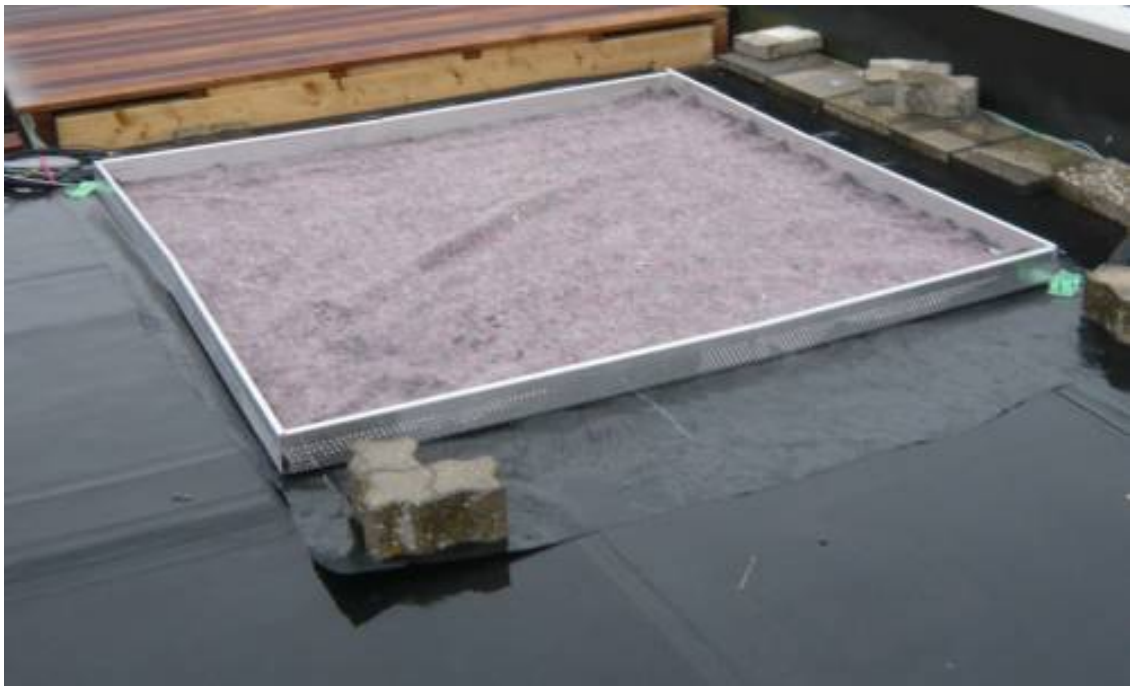
Bild 128:
Berechneter Verlauf des Wassergehalts in der OSB-Platte einer Leichtbaukonstruktion mit 40 cm „Isofloc L“, raumseitiger OSB-Platte und 18 cm Überdämmung der äußeren Schalung in Abhängigkeit von verschiedenen Gründachaufbauten.

Anlage 1

Erstellung der vier Versuchsfelder am IBP in Holzkirchen am 16. Dezember 2011:

Dachaufbau 1:

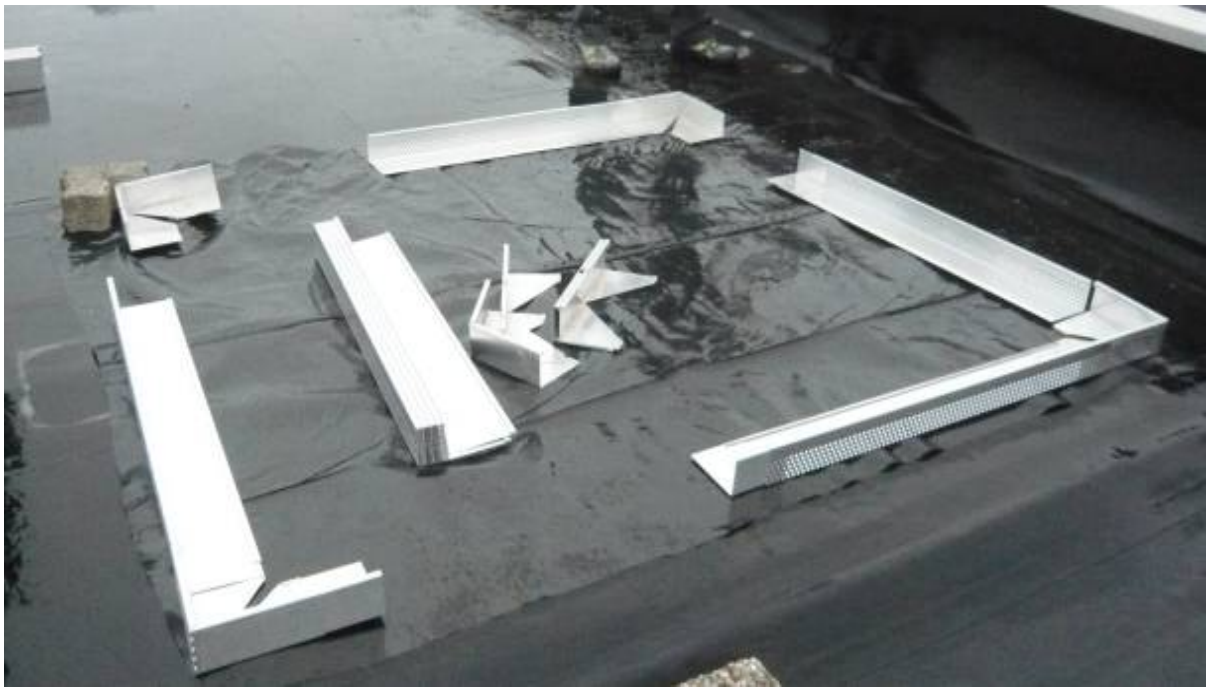


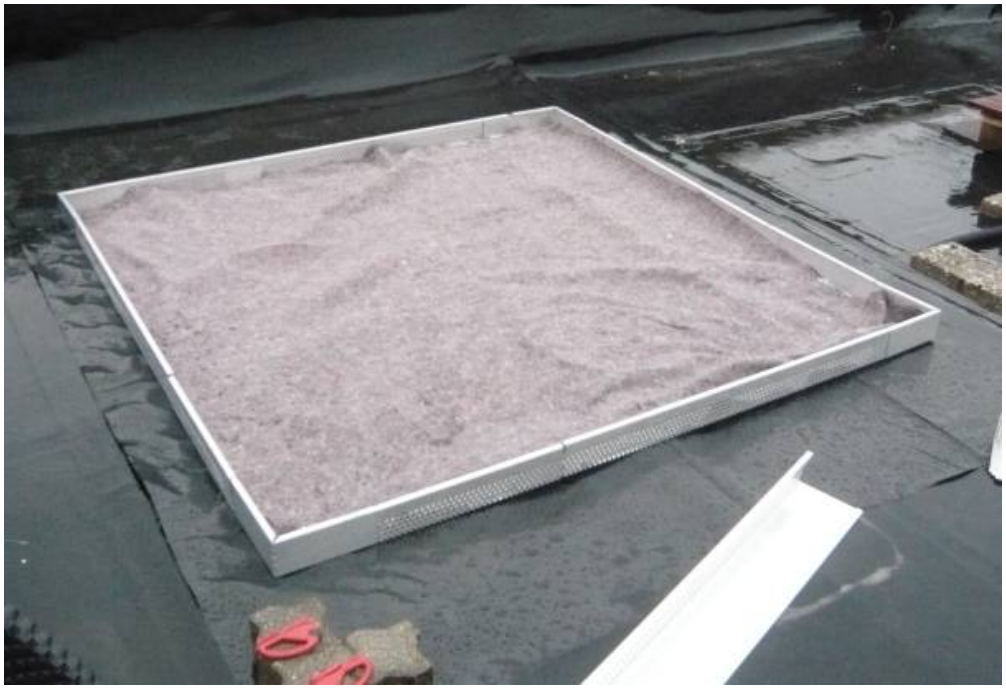






Dachaufbau 2:

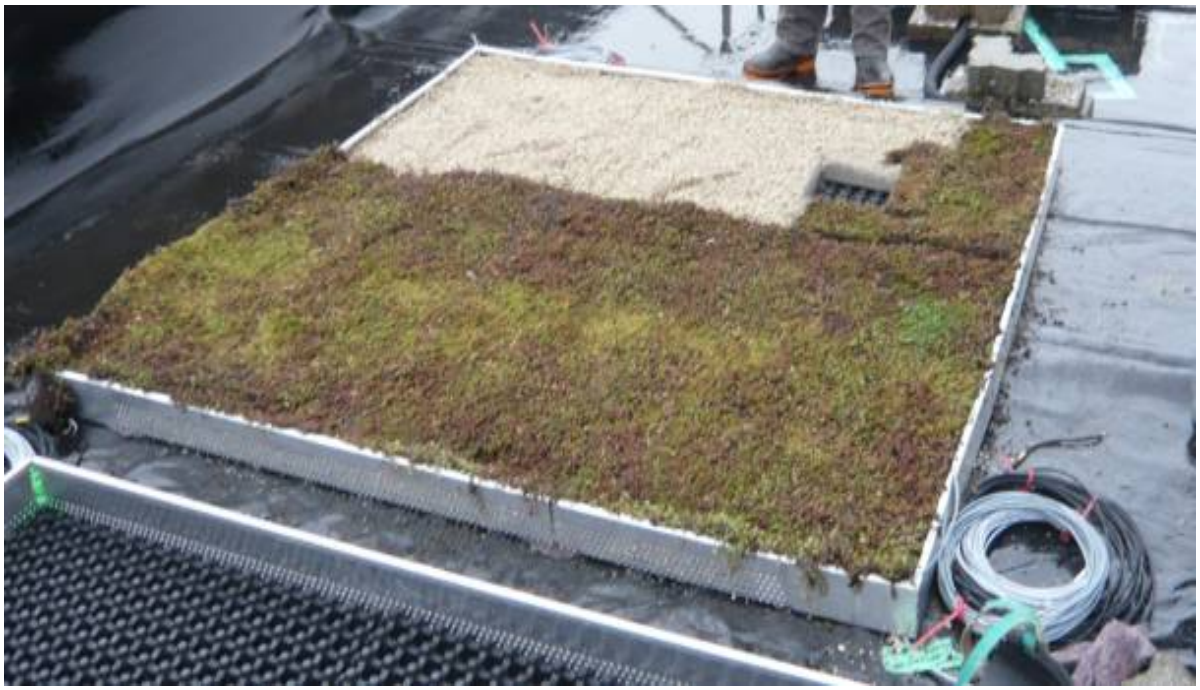






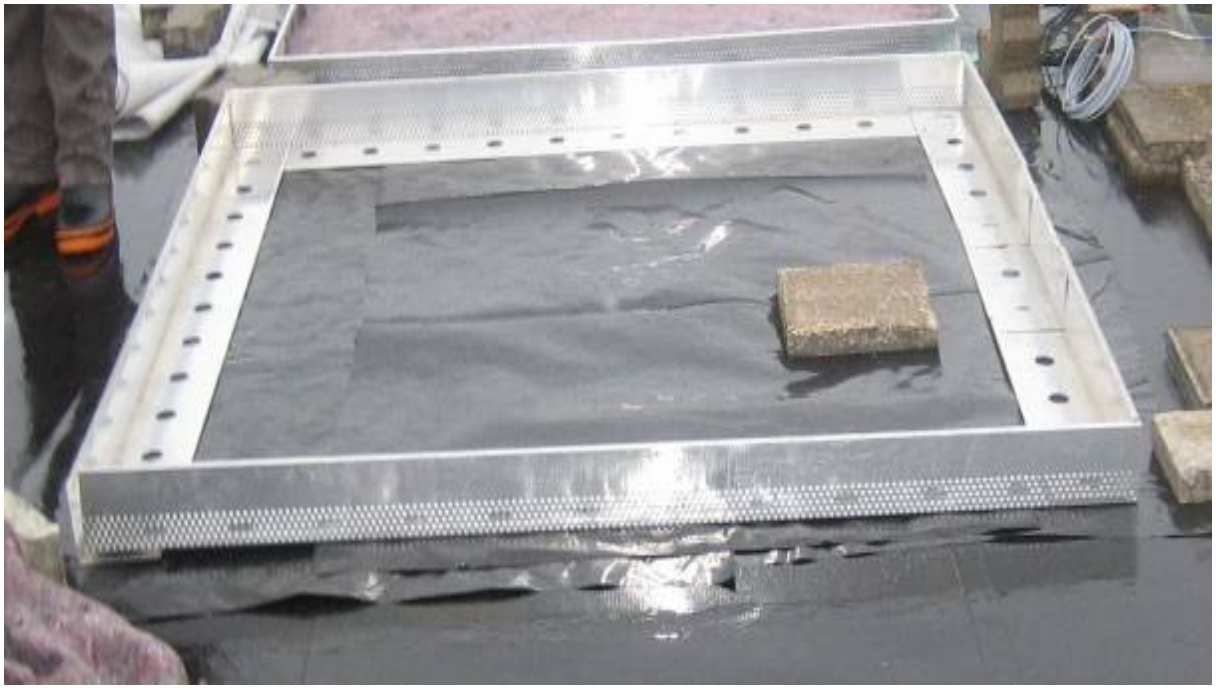








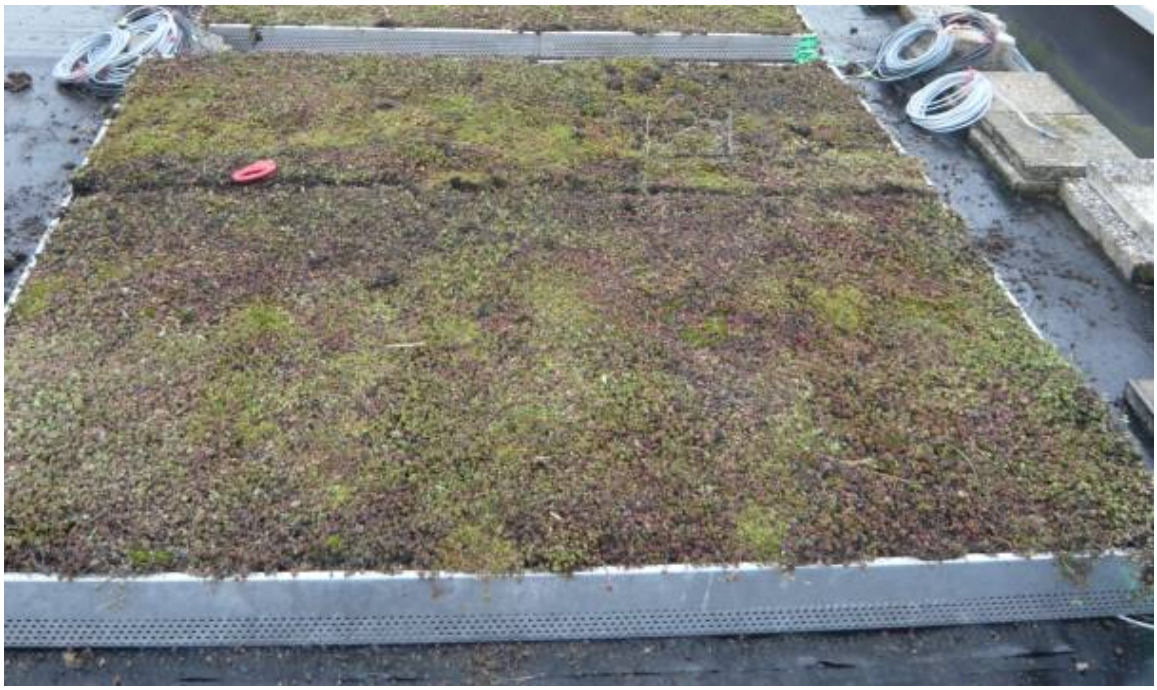
Dachaufbau 3:





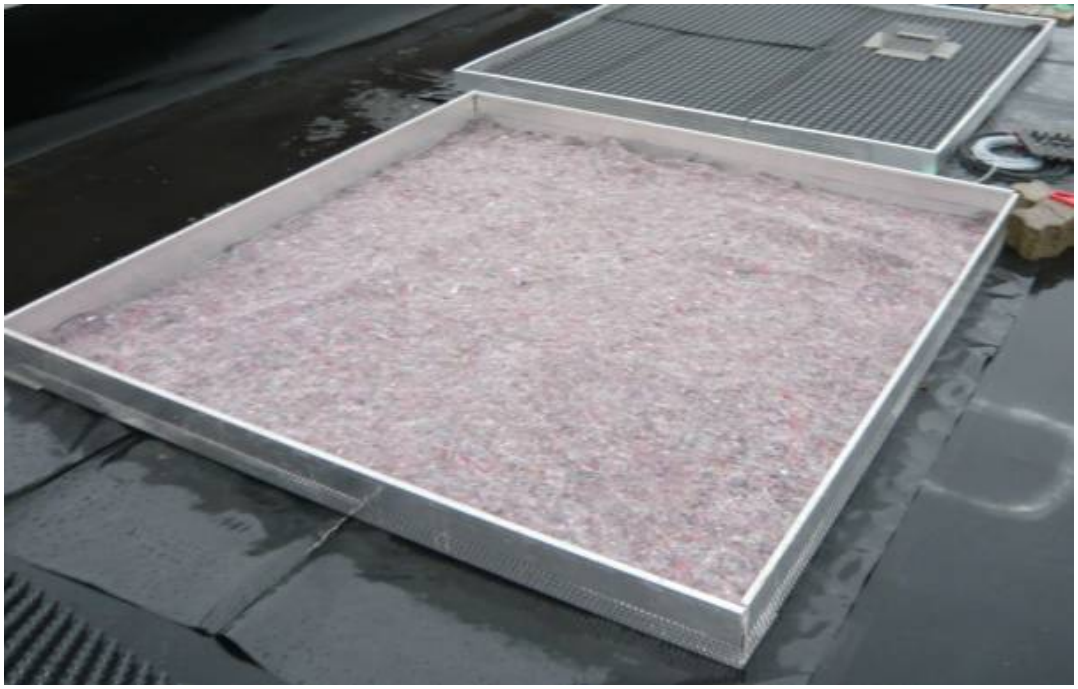


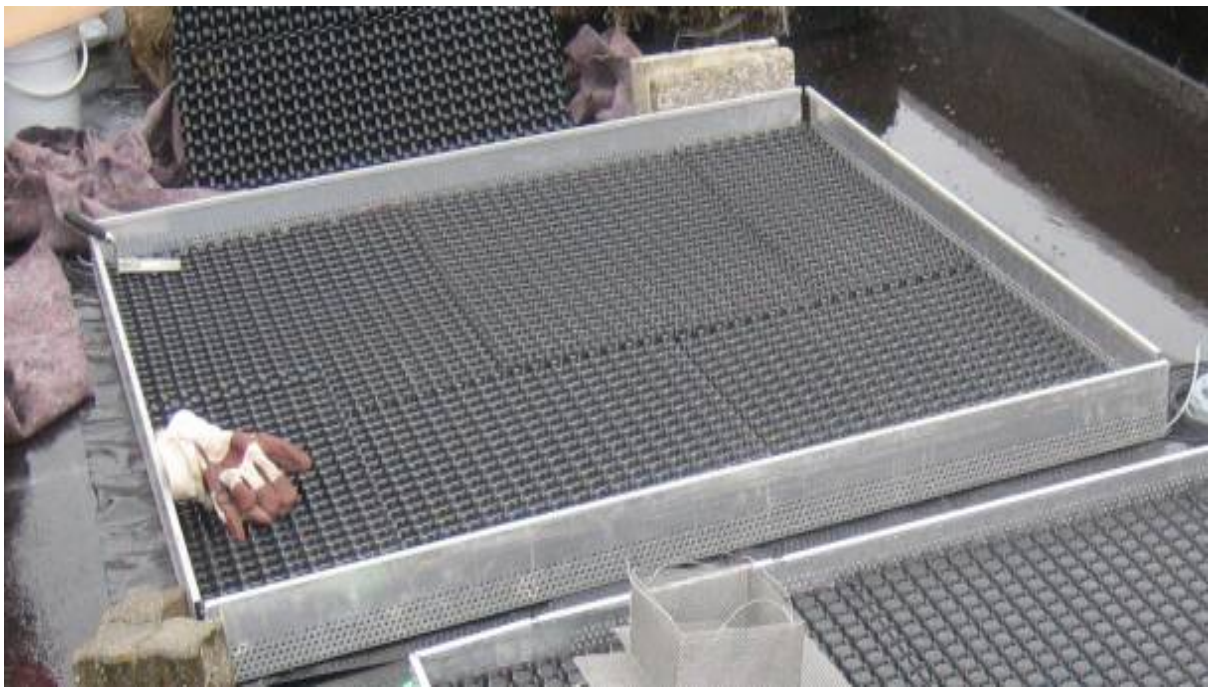




Dachaufbau 4:















Aufnahmen der Versuchsdächer zu verschiedenen Zeitpunkten:

20. Dezember 2011



9.Januar 2012



11. Januar 2012



20. Februar 2012

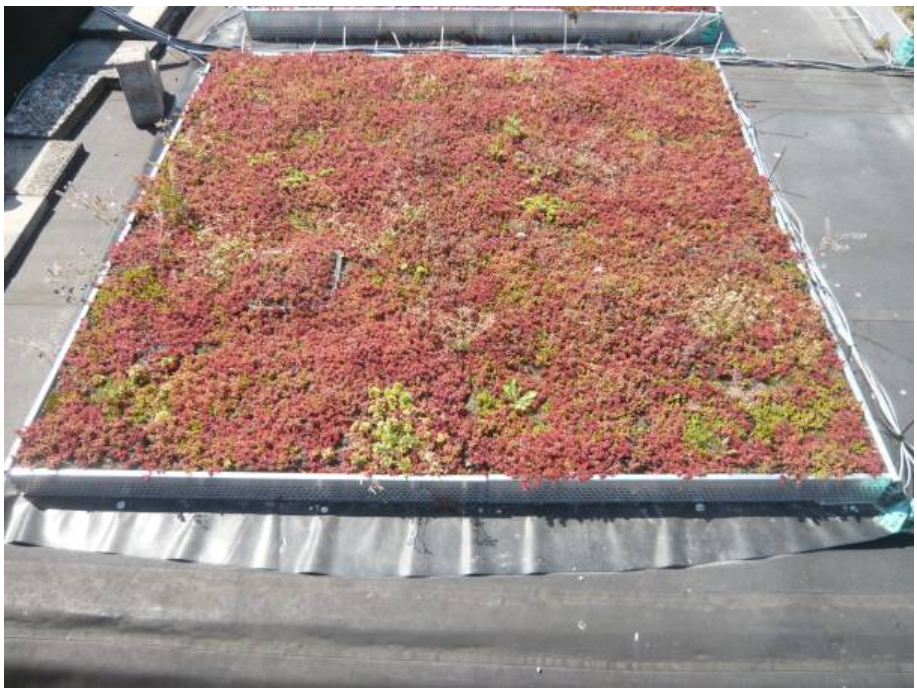


21. Mai 2012



Wägung der eingebauten Substratkörbchen am 14. August 2012:

Dachaufbau 1:







Dachaufbau 2:







Dachaufbau 3:







Dachaufbau 4:





